



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**NÁVRH DUÁLNÍ TISKOVÉ HLAVY PRO FDM 3D
TISKÁRNU**

DESIGN OF DUAL HOT-END FOR FDM 3D PRINTER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Prouza

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.

BRNO 2016

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Tomáš Prouza**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.**
Akademický rok: 2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Návrh duální tiskové hlavy pro FDM 3D tiskárnu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Autor provede rešerše tepelných hlav pro 3D FDM tiskárny, se zaměřením na systémy reprop. Na základě získaných znalostí navrhne vlastní duální tiskovou hlavu. Bude provedena její výroba a základní testy prototypu.

Součástí práce je i technicko ekonomické srovnání.

Cíle diplomové práce:

- rešerše fdm tisku
- rešerše 3D FDM tiskových hlav
- konstrukce duální 3D FDM tiskové hlavy
- výroba a testy 3D tiskové hlavy
- testy technologických podmínek
- vyhodnocení a doporučení autora

Seznam literatury:

CHUA, C.K., K.F. LEONG a C.S. LIM. Rapid Prototyping: Principles and Applications. 3. vyd. Singapore: World Scientific Publishing Co., 2010, 512 s. ISBN 978-981-277-897-0.

WANG, Wego. Reverse Engineering: Technology of Reinvention. 1. vyd. Boca Raton, Florida: Taylor & Francis Group, 2011, 322 s. ISBN 978-1-4398-0630-2.

HECHT, Jeff. Dawn of the self-replicating machine. The New Scientist. roč. 198, č. 2659, s. 28.

NORTON, Robert L. Cam design and manufacturing handbook. New York: Industrial Press, 2002, 610 s. ISBN 0-8311-3122-5.

BILÍK, Oldřich a Martin VRABEC. Vrabec Martin Technologie obrábění s využitím CAD/CAM systémů. Ostrava: Vysoká škola báňská-Technická univ., 2002, 128 s. ISBN 80-248-0034-9.

PLCHOVÁ, Anna a Michal KOLESÁR. Moderní metody v konstrukční praxi. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2004, 66 s. ISBN 80-248-0538-3.


PABLA, B.S. a M. ADITHAN. CNC Machines. 2. vyd. New Delhi: New Age International, 2008, 140 s. ISBN 9788122420197.

PÍŠKA, Miroslav et al. Speciální technologie obrábění. 1. vyd. Brno: CERM, 2009, 246 s. ISBN 978-80-214-4025-8.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16.

V Brně, dne 30. 11. 2015





prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu



doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá studiem technologie 3D tisku, přičemž je zde blíže popsána konkrétní technologie, kterou využívají tiskárny RepRap. Uvedená technologie je testována na tiskárně typu Rebel II. Získané poznatky byly využity při formování návrhu duální 3D tiskové hlavy. Tato duální 3D tisková hlava je navržena a vyrobena ve dvou základních variantách, přičemž první varianta odhaluje nedostatky uvedeného řešení a druhá varianta je již modifikována a testována. Z uvedeného testování je následně provedeno vyhodnocení ohledně použitelnosti, funkčnosti a ekonomického zhodnocení výroby této duální 3D tiskové hlavy.

Klíčová slova

RepRap, 3D tisk, duální tisková hlava, FDM, bowden

ABSTRACT

This master thesis is focused on a research in the field of 3D printing technology. During the research a particular technology, being regularly applied by the RepRap printers, is described. Mentioned technology is tested on a Rebel II printer model. The findings are applied to the dual 3D extruder design project. This dual 3D extruder is designed and made in two basic options, where the first option discovers the shortcomings and the second option is modified and tested. In the following step, assessment of applicability, functionality, as well as economic analysis of production of this dual 3D extruder is made.

Key words

RepRap, 3D printing, dual extruder, FDM, bowden

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PROUZA, Tomáš. *Návrh duální tiskové hlavy pro FDM 3D tiskárnu*. Brno 2016. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 104 s. 2 přílohy. Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Návrh duální tiskové hlavy pro FDM 3D tiskárnu** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Bc. Tomáš Prouza

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Oskaru Zemčíkovi, Ph.D. za podmětné vedení, vstřícné jednání a především odborné rady objasňující obsáhlou problematiku 3D tisku.

Děkuji lidem stojícími za weby: www.3Draty.cz, www.plastymladec.cz a www.rebelove.org, kteří mi bezplatně poskytli pro testování coldendy, testovací tiskové struny a konzultace nad problematikou 3D tisku.

Díky patří mé rodině a přítelkyni Markétě za trpělivost a podporu při studiu.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ.....	6
PODĚKOVÁNÍ.....	7
ÚVOD.....	11
1 RAPID PROTOTYPING	12
1.1 Projekt RepRap.....	15
1.2 Technologie FDM	16
1.2.1 Tisková hlava	17
1.2.2 Cold end	18
1.2.3 Hot end	19
1.2.4 Speciální tiskové hlavy	21
1.2.5 Podávání materiálu	27
1.3 Tiskové materiály.....	28
1.3.1 Vybrané materiály	30
2 NÁVRH 3D TISKÁRNY	33
2.1.1 Rám tiskárny	36
2.1.2 Vyhřívaná podložka	36
2.1.3 Napájecí zdroj 3D tiskárny.....	37
2.1.4 Elektronika.....	38
2.1.5 Krokové motory	40
2.1.6 Tisková hlava	41
2.1.6.1 Popis hlavních částí tiskové hlavy:	42
2.1.7 Koncový spínač	45
2.1.8 Tisková struna	46
3 NÁVRH 3D TISKOVÉ HLAVY METODY FDM.....	47
3.1 Požadavek kompatibility se stávající tiskárnou	47
3.2 Požadavek funkčnosti tiskové hlavy	51
3.3 Požadavek běžné výrobitelnosti	52
3.4 Požadavek nízké hmotnosti konstrukce tiskové hlavy	53
3.5 Požadavek nenáročné montáže	54
3.6 Požadavek nízké pořizovací ceny	54
4 KONSTRUKCE DUÁLNÍ 3D TISKOVÉ HLAVY	55
4.1 Tisková hlava varianta „A“	56
4.2 Tisková hlava varianta „B“	57
4.3 Konstrukce topného tělesa	57

4.3.1 Ohřívací blok varianta „A“	58
4.3.2 Topné těleso varianta „B“	59
4.4 Konstrukce heatbrake	59
4.4.1 Heatbrake varianta „A“	60
4.4.2.1 Heatbrake varianta „B1“	60
4.4.2.2 Heatbrake varianta „B2“	61
4.4.2.3 Heatbrake varianta „B3“	62
4.5 Konstrukce chladícího žebrování	62
4.5.1 Chladící žebrování varianta „A“	62
4.5.2 Chladící žebrování varianta „B“	63
4.6 Konstrukce tvarového držáku ventilátoru	64
4.6.1 Tvarový držák ventilátoru varianta „A“	64
4.6.2 Tvarový držák ventilátoru varianta „B“	64
4.7 Kotvení tiskové hlavy k polohovacím částem	65
4.7.1 Kotvení tiskové hlavy k polohovacím částem varianta „A“	65
4.7.2 Kotvení tiskové hlavy k polohovacím částem varianta „B“	68
4.8 Konstrukce bowdenového mechanismu	69
4.8.1 Rám 3D tiskárny Rebel II	70
4.8.2 Cívky s tiskovou strunou	70
4.8.3 Krokové motory	70
4.8.4 Pohon tiskové struny	70
4.8.4 Posunutí koncového dozaru osy z	71
4.8.5 Bowdeny tiskové struny	71
4.8.6 Závitová spojka	71
4.8.8 Elektrické vodiče	72
4.9 Konstrukce trysky	72
4.10 Topný rezistor	72
4.11 Termistor	73
5 VÝROBA A KOMPLETACE 3d TISKOVÝCH HLAV	74
5.1 Výroba ohřívacího bloku	74
5.2 Výroba přívodní hřídele	75
5.3 Výroba tvarového držáku ventilátoru	76
5.3 Kompletace tiskové hlavy varianty „A“	77
5.5 Kompletace tiskové hlavy varianty „B“	79
5.6 Softwarové nastavení tiskárny	80
6 TECHNOLOGICKÉ TESTY	81

6.1 Technologické testy varianty „A“	81
6.1.1 Průběh testování varianty „A“	82
6.1.2 Vyhodnocení varianty „A“	83
6.2 Technologické testy varianty „B“	84
6.2.1 Průběh testování varianty „B“	85
6.2.2 Použitelnost tiskové hlavy varianty „B“	90
7 zhodnocení ekonomických parametrů	92
7.1 Pořizovací cena duální tiskové hlavy varianty „B1“	92
ZÁVĚR	95
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	96
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	103
SEZNAM PŘÍLOH.....	104

ÚVOD

Stále se zvyšující nároky na výrobu, kladou technikům otázku, jak daný problém řešit lépe. Tímto uvažováním bylo v historii lidstva dosaženo technologické úrovně, již máme aktuálně k dispozici. Disponujeme technologiemi, které byly dříve považované jako nerealizovatelné, nebo jen velmi obtížně. Vývoj povětšinou probíhal zlepšováním nově objevené technologie, která byla postupně zdokonalována, až do určitého momentu, kdy bylo na dané technologii dosažení drobných zlepšení za cenu velmi náročných postupů a obtížného výzkumu. S přibývajícím požadavky na výrobu se muselo na danou problematiku začít nahlížet pomocí jiného principu. Toto je i případ Aдитivní technologie, která je v podstatě obráceným principem obrábění, kdy místo odebrání materiálu je materiál přidáván, čímž je tvořeno těleso finálního dílce.

Aдитivních technologií je již rozvinuta celá řada. Lze tvořit dílce pomocí vytvrzování pryskyřic, spékání prášků, lepení papírových vrstev, nanášení plastu a další.

Aktuálně je jednou z nejdostupnějších variant metoda FDM. Při této metodě je materiál nanášen ve formě nataveného plastu a pomocí počítačem řízené polohovací trysky, přesně umisťován v požadované trajektorii. Výstupy z této metody jsou však omezeny konstrukcí výrobku, kde není možno běžně tisknout nad volné převisy a k jejich překonání je nutno různých úprav tisku. I tak jsou některé modely běžně nevytisknutelné a proto je nutno pro tisk vytvořit podporu, která samotný proces umožní. Tyto podpory je výhodné taktéž tisknout na 3D tiskárně. Po dohotovení dílu je nutné tyto podpory z výrobku odstranit a vzniklé otřepy obrousit.

Pro jednodušší odstranění podpor je jejich složení vhodné volit na základě oddělitelnosti se základním materiálem. Jako vhodný příklad vlastností se jeví materiály křehké a méně přilnavé pro lehčí odlomení, či rozpustné v roztoku, ke kterému je základní materiál tisku netečný.

Pro možnost tisku dílce a podpor současně, tak je třeba, aby tiskárna disponovala patřičnou technologií. Kromě tisku jedním typem vlákna během tisku, musí umožňovat tisknout i vláknem s rozdílnými vlastnostmi. Variant jak toho docílit existuje několik. Například je možné materiál před posunem do trysky nadělit a přesně dávkovat. Lze také použít 2 trysky, přičemž, každá tiskne jedním materiálem. Je možné též použít trysky kombinované, která mají vícero vstupů a pouze jeden výstup. Každá ze zmíněných variant má své výhody a nežádoucí vlastnosti, které mají vliv jak na kvalitu tisku, tak na technologickou náročnost stroje a finální čas jednotlivého tisku.

V této práci jsou zmíněné přístupy rozebrány se zaměřením na duální tiskovou hlavu metody FDM v pojetí RepRap. Z této teorie vycházející poznatky jsou aplikovány a je vyhotovena duální 3D tisková hlava s příslušnými modifikacemi 3D tiskárny. Systém je odzkoušen a vyhotoven závěr.

1 RAPID PROTOTYPING

Ve 21. století, v době téměř propojeného světa, jak informačními cestami, tak těmi obchodními, je náročné dlouhodobé působení na trhu, natož na něj teprve vstoupit.

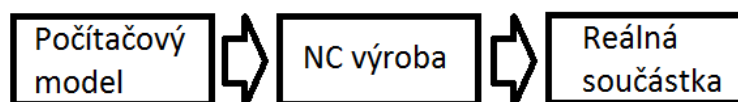
Velmi důležitým aspektem pro sériovou výrobu je zhotovení prototypu, který demonstruje přednosti a upozorní na nedostatky, které nebyly odhaleny ve fázi virtuálního modelu. Tento prototyp musí být vyroben s dostačujícími vlastnostmi, rychle, snadno a levně. Je očekávatelné, že jej bude nutno několikrát upravovat před finálním zavedením produktu do výroby. K těmto účelům je velmi vhodná a nyní hojně uplatňovaná metoda rychlé výroby prototypu z anglického a nyní celosvětově uznávaného názvu „rapid prototyping“. Metodou rapid prototyping je myšlena rychlá výroba prototypu pomocí 3D tisku [1].

Před samotným tiskem je nutno získat model, ten je pro 3D tisk možné vytvořit dvěma způsoby. Jedná se o modelování pomocí CAD systému, nebo užití reversního inženýrství [2]. Rozdíl v postupu je znázorněn na diagramu (obr. 1).

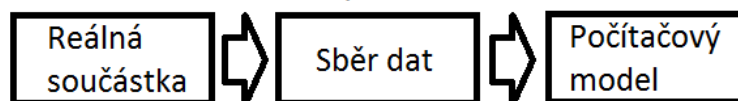
CAD je celosvětově uznávanou zkratkou z anglického *Computed Aided Drawing*, tedy počítačem podporovaného kreslení. CAD systémy jsou schopny rychlého virtuálního ztvárnění a dokonce i simulací požadované funkce, prozatím neexistujícího výrobku. Tyto systémy umožňují různé predikování možných závad, například i vypočítání rezonanční frekvence a životnost dílce [3].

Reversní inženýrství, nebo také zpětné inženýrství, se používá pro vyhotovení rozměrově a tvarově ekvivalentního předmětu ke kopírovanému originálu. 3D model je získáván pomocí 3D skenerů, které mohou být dotykové, optické, laserové a další. Skenovaný model je přesnou kopií, kterou je možné dále upravovat. Při 3D skenování je vytvářen prostorový model dle originální součástky. Při tomto procesu je tvořeno velké množství dat, a je tedy třeba výsledek zpracovávat na výkonné počítačové technice [2], [4] (viz obr. 1).

Klasický proces



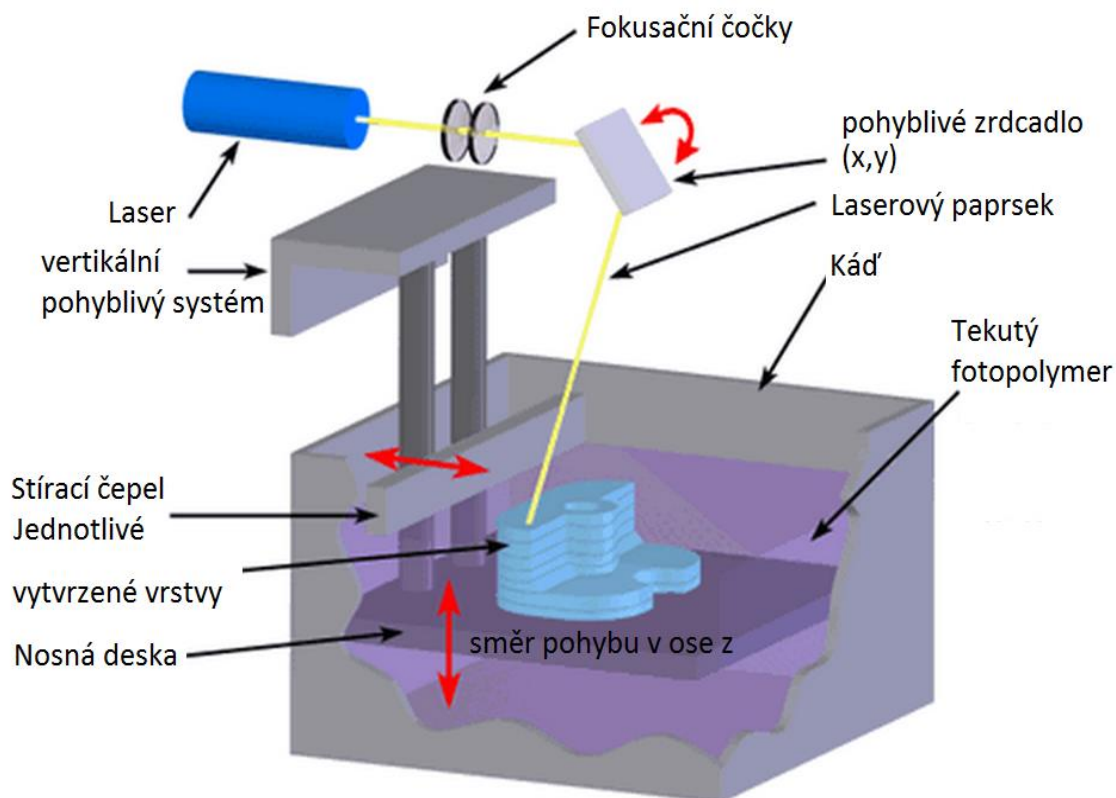
Proces reverzního inženýrství



Obr. 1 Proces reverzního inženýrství [5].

Rapid prototyping je oblast technologií používaných pro rychlou výrobu prototypů pomocí 3D tisku. K tomuto účelu bylo vyvinuto množství technologií opírajících se

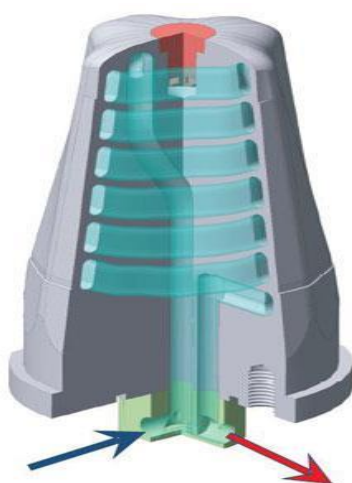
o počítačové systémy [6]. První metodu rapid prototypingu vyvinul Charles W. Hull v roce 1983 a nazval ji Stereolitografie (zkratka SLA). Nechal si ji patentovat pro svoji firmu 3D Systems v roce 1986. Princip metody SLA spočívá v postupném vytvrzování vrstev fotopolymeru usměrňovaným UV laserem [7], [8]. Tato metoda je zázorněna na následujícím (obr. 2).



Obr. 2 Stereolitografie (zkratka SLA) [9].

Kromě metody SLA je vyvinuta celá řada metod, při nichž lze tisknout širokým spektrem materiálů. Od druhu materiálu se pak většinou odvíjí samotná metoda. Lze tisknout například z vosku, papíru, plastu, kovu, keramiky a dalších [10].

V současné době jsou metody rapid prototypingu hojně využívány v mnoha odvětvích, jakými jsou strojírenství, architektura, zdravotnictví, obchodní prezentace, umění a mnohá další. Výroba touto technologií je však časově a finančně náročná. Je volena tam, kde se jeví jako výhodnou, počínaje od výroby prototypů, až po finální dílce, které jsou jinak vyrobitelné obtížně, zdlouhavě, nebo jsou dokonce vyrobitelné pouze touto technologií. Příkladem výroby jsou licí formy, nástroje s přesně vedenými chladicími kanálky, či kloubní náhrady opatřené porézní strukturou pro lepší srůstání s biologickou tkání. Oba zmíněné příklady možno shlédnout na (obr. 3). Za zmínku také stojí možnost tisku z materiálů jinak obtížně spojitelných. Spoje dvou odlišných materiálů je docíleno nanášením gradientních vrstev, tedy tvořit plynulé přechody mezi různými druhy materiálů [11].



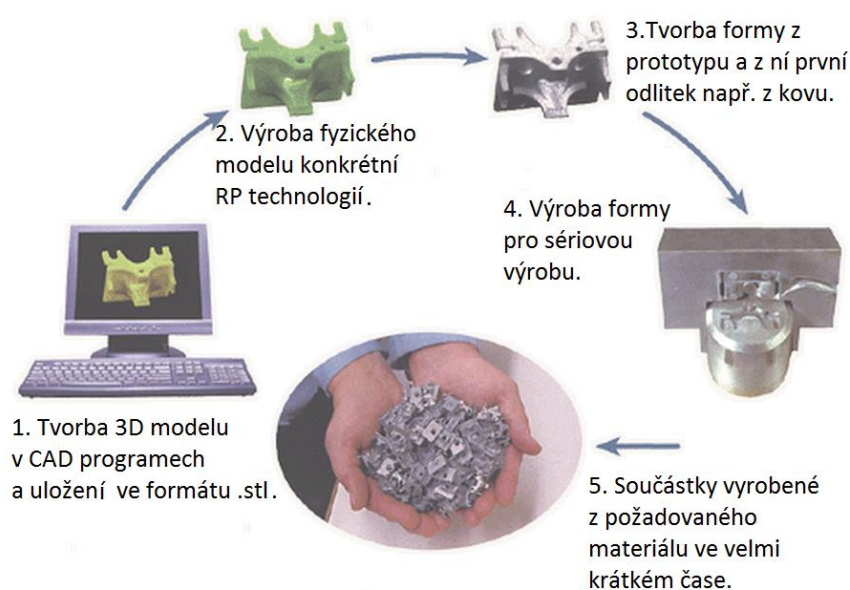
a)



b)

Obr. 3a Část licí formy opatřená chladicími kanálky [12]. Obr. 3b Protéza opatřená porézním vzorem ze slitiny titanu (TiAl6Nb7) [11].

Příklad užití 3D tisku ve slévárenství. Nejprve je vytvořen model výrobku, který je získán modelováním v CAD systému, či za použití reversního inženýrství. Tento model je vytisknut z běžného materiálu, například z plastu. Následně je vytvořen negativ obtiskem do formovací směsi. Tento negativ je možno použít jako jednorázovou formu, nebo do něj dodat další směs, která se použije jako negativ budoucí formy. Nakonec se vyrobí odlitek, který slouží jako sériová forma [13], [2], [14], [15]. Princip je znázorněn na (obr. 4).

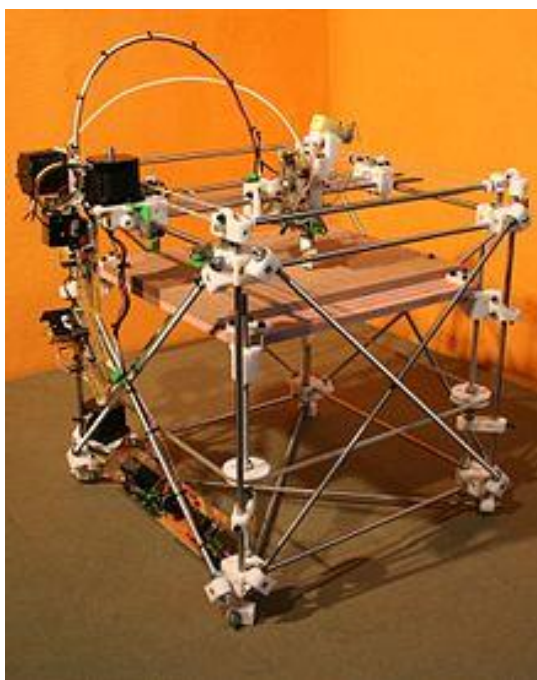


Obr. 4 Příklad sledu operací od PC modelu po započetí sériové výroby [16].

1.1 Projekt RepRap

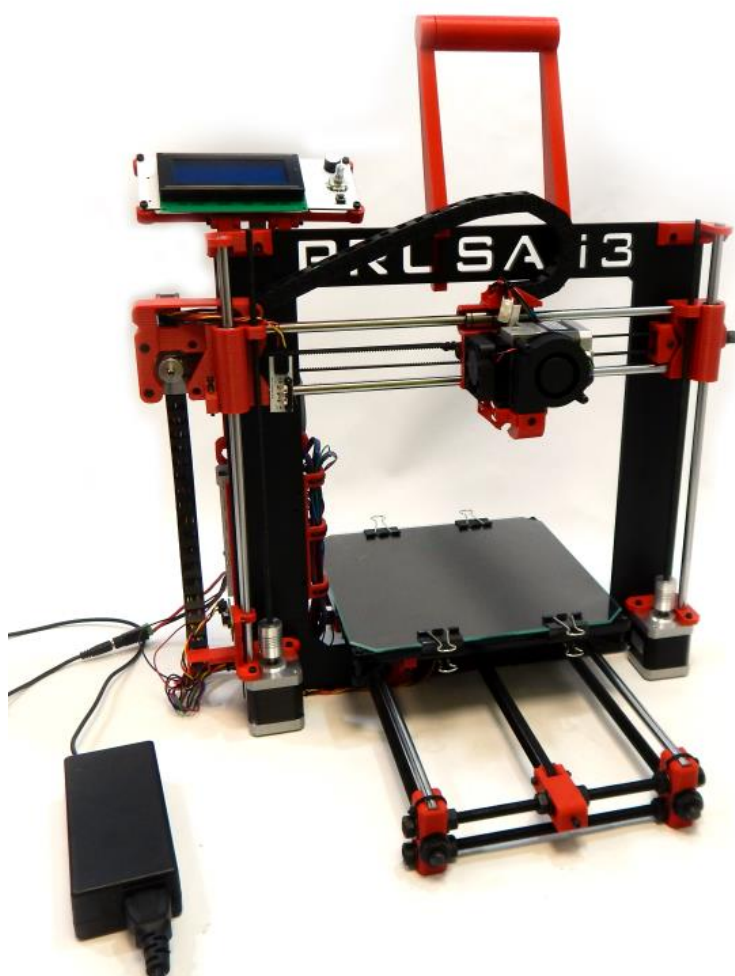
RepRap je zkratkou *replicating rapid prototyper*, což znamená rychlá sebereplikace. K tomuto účelu je využíváno 3D tiskáren, které jsou schopny tisknout velkou část konstrukčních dílů, z nichž jsou sami vytvořeny. Tímto postupem je možno dosáhnout na další stejné stroje, či provádět úpravy na tiskárnách samotných. Projekt byl založen v roce 2005 doktorem Adrianem Bowyerem a na trh byl uveden jako tzv. open source, což znamená volně šiřitelný. Tímto krokem otevřel cestu progresivnímu vývoji. Zejména díky tomuto zpřístupnění se projektu mohly účastnit desetitisíce uživatelů z téměř celého světa. Uživatelé tiskárny sami dále vyvíjí a veřejně sdílí informace ohledně stavby hardware i software určeného pro tento typ tiskáren [17]. Komunita okolo RepRapu se sdružuje především na internetových stránkách, ať již celosvětových či lokálních. Komunikace i publikace probíhá především článkovou, či diskuzní formou na původních stránkách www.reprap.org, www.thingiverse.com, facebooku, twitteru a podobně. Skrze tato média si uživatelé vyměňují nápady, znalosti a publikují své invence.

Firmware a software je k těmto účelům zpřístupněn pod licencí GNU GPL. GNU GPL je zkratkou anglického General Public License GNU, v překladu „všeobecná veřejná licence GNU“. Jedná se o licenci pro svobodný software. Původní verze publikována Richardem Stallmanem pro GNU. GNU je operační systém nepracující na bázi unixu, ale na bázích svobodného softwaru. Licence GNU GPL je způsob použití autorského práva, které znamená, že se jedná o bezplatně šiřitelný nekomerční obsah a veškerá díla vycházející z původního díla, spadají taktéž pod původní copyleftovou licenci. Následně vzniklá díla jsou tedy také volně použitelná a šiřitelná. Výše zmíněná opatření vytvořila prostředí pro první zveřejněnou tiskárnu projektu RepRap, model Darwin [18]. Model Darwin je k náhledu na (obr. 5).



Obr. 5 Tiskárna Darwin verze 1.0 [19].

Tiskárna Darwin je nazvána podle známého biologa Charlese Roberta Darwina. Spojení s tímto výzkumníkem, jenž je otcem myšlenky evoluce, vystihuje zároveň i myšlenku zakladatele projektu RepRap o sebereplikaci a dalším vývoji. Nyní je již tiskárna Darwin považována, díky své konstrukci, za zastaralou a nahradily jí další modely. Po prvním modelu Darwin následovalo mnoho dalších a stále se do databáze přidávají. Na původní internetové stránce www.reprap.org bylo k dubnu 2015 zpřístupněno k Darwinovi minimálně dalších 43 variací volně šiřitelných tiskáren, k dubnu 2016 již 65. [19]. Příkladem 3D tiskárny je i Průša i3 Hephestos, velmi úspěšný model z roku 2013 (obr. 6). Tento model vyvinul Josef Průša jako vylepšení svých předchozích verzí. Tento model, dle webu sdružujícího komunitu 3D tiskařů www.3dhubs.com je v roce 2015 hodnocen nejvyšším ratingem zúčastněných tiskáren. Hodnocení obdržel za měsíční nárůst počtu kusů těchto tiskáren [21].

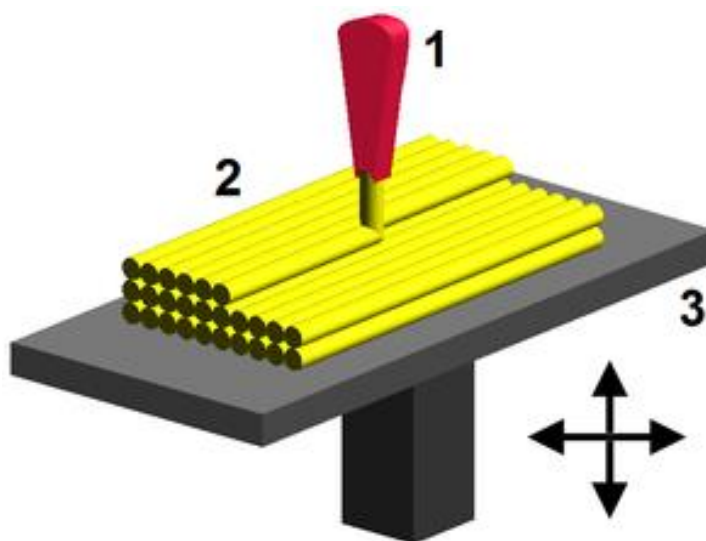


Obr. 6 Tiskárna Průša i3 Hephest [20].

1.2 Technologie FDM

Tuto technologii vyvinul S. Scott Crump koncem 80. let 20. století. Na trh byla uvedena společností Stratasys, Ltd., kterou Crump vlastnili spolu se svou ženou [22].

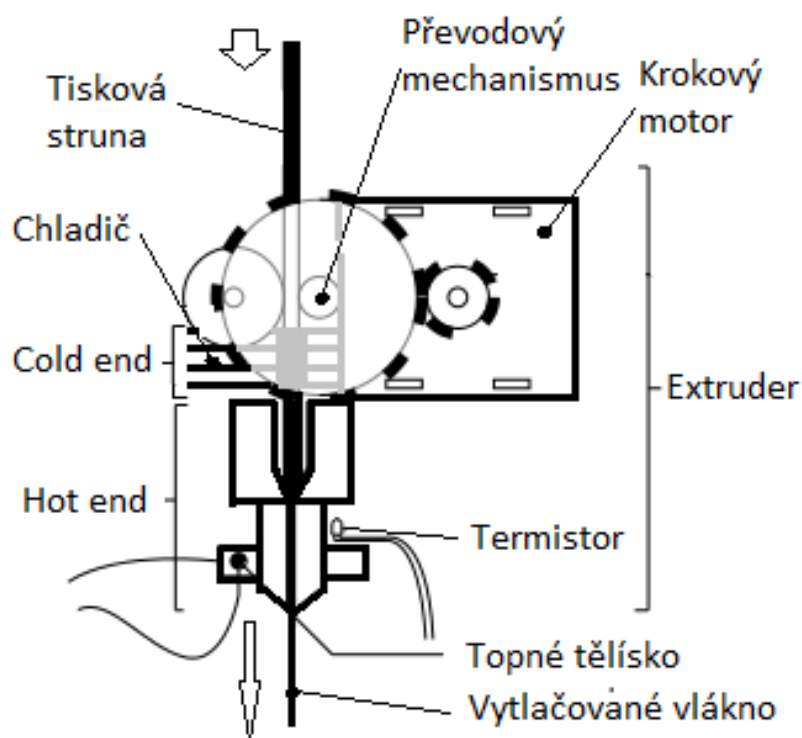
U metody FDM dochází k natlačení materiálu ve formě struny do tiskové hlavy, kde je materiál nataven a dále vytlačován přes trysku. Tisková hlava je polohovatelná v kombinaci s tiskovým stolem a dle číslicového řízení vytlačuje materiál ve vrstvách po přesně určené trajektorii, rychlosti a daném množství. Tiskárna skládá vrstvu po vrstvě, přičemž postupuje postupně od stolu a nejnížší vrstvy po ty nejvyšší za předdefinovaných podmínek. Podmínkami jsou myšleny například správně zvolené a orientované tvary výrobku a jeho možné podpory proti zhroucení, teploty výstupního materiálu, vhodně zvolený předehřev tiskového stolu, materiál, z něhož bude výrobek tisknut a mnoho dalších [6], [23]. Zjednodušený postup nanášení vrstev je znázorněn na obr. 7.



Obr. 7 Schéma pokládání vláken tvořících součást technologií (1 Tisková hlava, 2 Nanesený materiál ve formě vláken. 3 Tiskový stůl) [24].

1.2.1 Tisková hlava

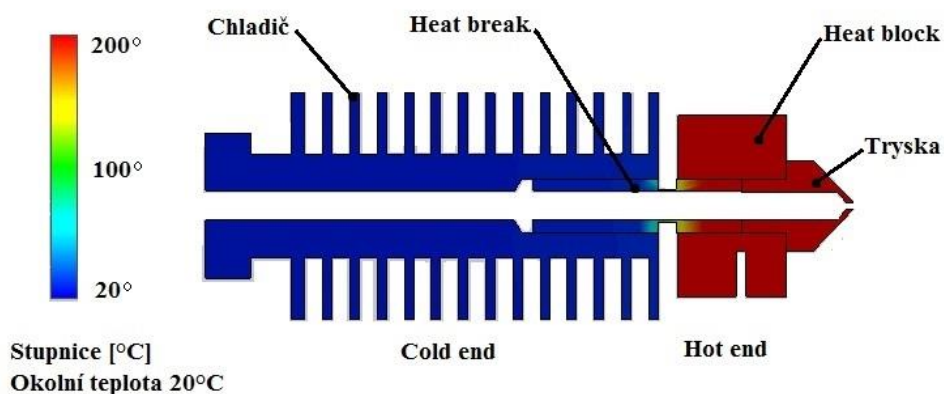
U technologie FDM je tisková hlava jednou z nejdůležitějších částí. Často je nazývána extruder, kvůli její funkci. Tisková hlava je část, kde dochází k natavení materiálu a jeho vytlačování skrze trysku. Tento vytlačený materiál je vrstven a tvoří tištěný dílec. Natavení bývá prováděno zahřátím materiálu lehce nad tavicí teplotu taveného materiálu a k jeho vytlačování dochází tlakem materiálu materiálem nově přiváděným. Tento materiál je většinou přiváděn ve formě tiskové struny a to krokovým motorkem přes převodový mechanismus. Zejména díky kvalitní tiskové hlavě dosáhneme vyšší kvality tisku, proto je na její konstrukci kladen velký důraz. Pro ideální výstupní vlastnosti tiskové hlavy je nejpodstatnějším parametrem správné tepelné rozložení, zvláště nastavené pro jednotlivé materiály, přesná polohovatelnost výstupu trysky vůči podložce a přesné množství dodávaného materiálu k natavení. Pro dosažení zmíněných vlastností bylo vyvinuto množství variací tepelných hlav. Základní varianta s popsányi komponenty je vyobrazena na Obr. 8. Existují však i speciální varianty, kde nedochází k natavení a dochází k vytlačení již plastického materiálu pouze vyvíjeným tlakem. Tento typ je nazýván frostruder a je používán k vytlačování plastických hmot, jakými jsou například zředěná hlína, těsto na pekařské výrobky, potravinářská barva a podobně [25].



Obr. 8 Tisková hlava [25].

1.2.2 Cold end

Cold end je součástí tiskové hlavy a je překládán jako studený konec. Obvykle se jedná o část vytlačovacího stroje, která slouží k přechodu mezi hot endem a podávanou tiskovou strunou. Tisková struna se nesmí před samotnou tavnou přehřát, mohla by se lepit na stěny, nesprávně dávkovat materiál, ale i téci protisměru podávání a v chladné části ztuhnout a znemožnit tím tisk. Pro kvalitní tisk je tedy vhodné, aby byla struna tavena až v tavní komoře hot endu. Proto se cold end doplňuje různými mechanismy pro zabránění přestupu tepla z hot endu dále. Často volenými metodami jsou korozivzdorná ocel s krčkem, teflonové bariéry zabraňující styku materiálů s vyšší tepelnou vodivostí, pasivní chladiče umožňující odvod tepla a aktivní chlazení, která jsou na bázi ventilátoru, nebo méně často i vodního okruhu. Korozivzdorná ocel má součinitel vodivosti přibližně $16 \text{ W} / (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$. Zároveň je pevná, aby snesla zatížení tisku v zúženém krčku. Krček je zde používán pro malou plochu průřezu, tím neumožňuje nechtěný průstup tepla. Pro srovnání ocel s 1 % uhlíku má součinitel vodivosti $46 \text{ W} / (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$, je tedy zhruba 3x tepleně vodivější. Teflon se používá z důvodu stálosti vlastností, až do teploty 260°C a nízké teplotní vodivosti, která je přibližně $0,25 \text{ W} / (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$. Přestup tepla je znázorněn na (obr. 9), kde je viditelný největší rozdíl přechodu tepla v krčku korozivzdorné trubičky [25], [26], [28].



Obr. 9 Přechod tepla z hot endu na cold end [27]

1.2.3 Hot end

Z anglického jazyka překládáno jako horký konec. Jedná se o aktivní část tiskárny, která taví a tvaruje materiál. Toto provádí skrze koncovou trysku, anglicky zvanou nozzle. Kromě trysky a těla, jsou nezbytnými komponenty hot endu topné těleso a termistor, které zahřívají a regulují hot end na požadované teplotě. Na následujícím obrázku (obr. 10) je schematicky popsán jeden typ tavné hlavy v provedení pro průměr tiskové struny 1,75 mm a 3,0 mm. Rozdíl mezi nimi spočívá v rozdílném vložení teflonových vložek. Hot endy, které jsou kombinované s materiálem PTFE, či PEEK jsou nazývány hybridní. Na obrázku je také dobře patrný přechod mezi cold endem a hot endem, kdy jedna část má tiskovou hlavu ohřívat a druhá chladit, aby se tavná zóna příliš nevzdálila od výstupu trysky [15], [29], [30].



Obr. 10 Přechod mezi cold endem a hot endem [30].

Nejčastěji jsou hot endy vyrobeny z mosazi, slitin hliníku, mědi, oceli, skla, PTFE, PEEK a další. Na základě konstrukce z těchto materiálů se člení do dvou skupin na hot endy celokovové a peekové, neboli hybridní [31], [15].

1.2.3.1 Celokovové hot endy

Jsou vyrobeny z jednoho, nebo více kovových materiálů. Typicky to zahrnuje jádro z korozivzdorné oceli, ohřívavý blok ze slitiny hliníku a mosaznou, nebo ocelovou trysku. Celokovové hot endy mají výhodu jednoduché údržby, dlouhé životnosti a tisk za větších teplot. Nevýhodou pak je to, že musí být chlazeny aktivně. Chlazení se provádí prouděním vzduchu přiváděného ventilátorem, nebo prouděním vody hnané čerpadlem. Toto chlazení je nezbytné, aby nedocházelo k přenosu tepla skrze kov do oblastí, kde není požadováno, aby se materiál tisků tavit [31], [15].

1.2.3.2 Peekové hot endy

PEEK označuje termoplastický materiál, a to polyaryletherketone. Českým výrazem je pro něj ketron. Z tohoto materiálu je vyrobena část hot endu pokračující od topného tělesa ven. Díky malé tepelné vodivosti se teplo nešíří dále a zůstává koncentrováno v místě tavení materiálu. Tento způsob je vhodný zejména pro materiály, jenž mají nízkou teplotu tavení. Výhodou je, že není třeba aktivně chladit. Tento typ hot endu však není vhodné zahřívat na více než 240°C. Po překročení této teploty dojde k degradaci tohoto materiálu. U peekových typů hot endu je po určitém množství vytištěného materiálu, nutno vyměnit ketronovou část, která se opotřebovává. Materiál PEEK lze nahradit i teflonem (PTFE), má obdobné vlastnosti [15], [31]. Jejich srovnání je k dispozici v následující (tab. 1.1).

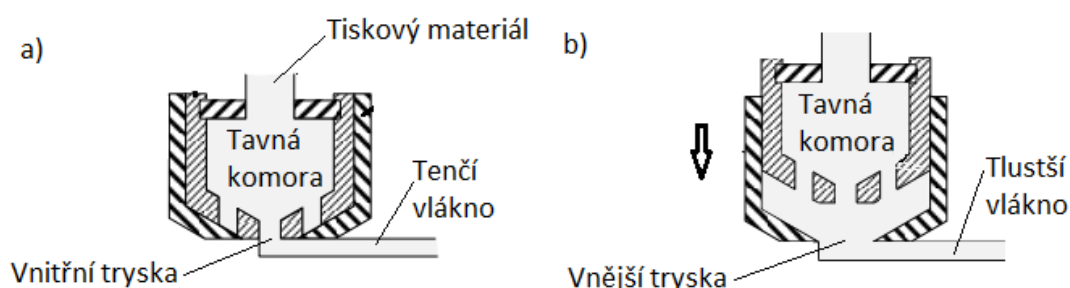
Tab. 1.1 Srovnání materiálu PTFE a PEEK [32].

Hlediska výběru	PTFE	PEE	Vhodnější
Cena	průměrná	dražší	PTFE
Pevnost v tahu	25-35 Mpa	90-100 Mpa	PEEK
Prodloužení	350-400%	30-40%	PTFE
Modul pružnosti v ohybu	495 Mpa	3900 Mpa	PEEK
Koeficient tření	0.03-0.05	0.35-0.45	PTFE
Teplotní odolnost	do 250°C	do 25 °C	-
Chemická odolnost	Inertní	Kyslík	PTFE
Koef. teplotní roztažnosti	$14 \times 10^{-5}/K$	$5 \times 10^{-5}/K$	PTFE
Obrobitelnost	Dobrá	Velmi dobrá	PEEK

1.2.4 Speciální tiskové hlavy

Tisk má své požadavky a ty vyžadují různá specifika konstrukce tiskáren. Díky tomu můžeme nyní tisknout s proměnnou tloušťkou vlákna, kombinovat materiály, barvy, zvýšit rychlost tisku, tisknout více dílů najednou apod. Každé tiskové zadání lze zpracovat vícero způsoby, a proto se také samotní vývojáři vydali různými směry.

Změny tloušťky tištěného vlákna lze dosáhnout například za pomoci tiskárny osazené 2 tryskami, kde jedna má větší průměr a tiskne hrubší strukturu. Takto se podstatně zvýší produktivita tisku a přitom díky možnosti užití trysky s menším průměrem zůstanou detaily v nesnížené kvalitě. Změny tloušťky tištěného vlákna lze dosáhnout také s využitím trysky se dvěma průměry implementovanými do sebe a ovládanými servomotorem. Návrh této tiskové hlavy zkracující čas tisku je vidět na (obr. 11). V pozici a) je zavřena vnější větší tryska a tiskárna tiskne detailnější strukturu, naopak v pozici b) je vnější tryska vysunuta a je jí umožněn tisk větším průměrem [6].



Obr. 11 Tisk se dvěma průměry vlákna jednou tryskou [33].

Změnit materiál, ať co do složení, tak do barevných variant, lze několika způsoby. Jednak řazením materiálu za sebe, dle požadovaných délek a vlastností pro jednotlivé vrstvy tisku, nebo více tryskami či kombinovanou tryskou.

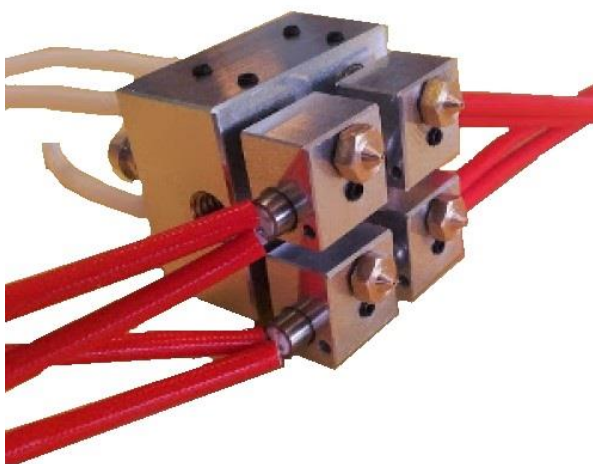
S technologií řazení materiálů za sebe přišla společnost Mosaic a umožnila tím tisk z více materiálů jednou tryskou. Tuto technologii nazvala SEEM. Takto je možné tisknout nejen obyčejné materiály, ale například PLA a elektricky vodivý materiál nazvaný F-Electric, díky kterému je tiskárna schopna tisknout vodivé obvody. Příkladem je tištěné svítidlo, kde je třeba dodat pouze diodu a baterii. U této technologie je však značně obtížné synchronizovat materiál s tiskárnou. Princip technologie je zobrazen na (obr. 12). Střední díl dělí struny dle požadované délky a řadí je za sebe. Do tiskárny putují nadávkované materiály tlačněním v bowdenovém vedení [34].



Obr. 12 Technologie Mosaic [34].

1.2.4.2 Vícenásobné hot endy

Vícenásobné hot endy umožňují tisk vícero předmětů zároveň, rychlejší tisk jednotlivých předmětů či tisk z více druhů materiálů. Jde o produktivnější metodu, s níž lze tisknout širší škálu výtisků. To je dáno možností kombinovat použité materiály. Je možné tisknout podpory, které dovolí tisk téměř jakéhokoliv tvaru. Hojně zastoupená je varianta dvou hot endů, zejména díky možnosti tisku podpory. Zajímavým představitelem vícenásobných hot endů je například hot end nazvaný Kraken, který je schopen tisku ze 4 trysek a je chlazen vodním okruhem (obr. 13). Kraken je kompaktní verze vícenásobných hot endů, která enormně nezmenší prostor tisku. To přitom obvykle bývá hlavní nevýhodou vícenásobných hot endů. Uživatelé RepRap tiskáren je často zmiňovanou problematikou kalibrace vícenásobných hot endů. Problém nastává při nastavení vzdáleností mezi jednotlivými tryskami, což při kombinované hotendu odpadá [35], [31].



Obr. 13 Vícenásobný hot end Kraken [35].

1.2.4.1 Kombinované hot endy

Tento typ kombinuje vícenásobné hot endy do jedné výstupní trysky, která je schopna tisknout bez korekcí polohy a bez výrazného zmenšení tisknutelného objemu. Nevýhodou je však mísení materiálu a při potřebě čistého přechodu nutnost tisknout takzvanou otírací věž, která je stavěna souběžně s tištěným dílcem a v případě změny materiálu, je na tuto věž vytištěna vrstva měněného materiálu, který má za účel vypláchnutí zbytků materiálu předchozího. Tím se docílí čistoty tisku. Nevýhodou u tohoto typu však je, že je nutno tisknout materiály se stejnou tavící teplotou. Je proto využívána především pro předměty ze stejného materiálu s rozdílnou barvou. Velkou výhodou je, že lze barvy mísit a tisknout větší barevné spektrum [31], [36]. Jako příklad provedení je uveden na následujícím obrázku (obr. 14).



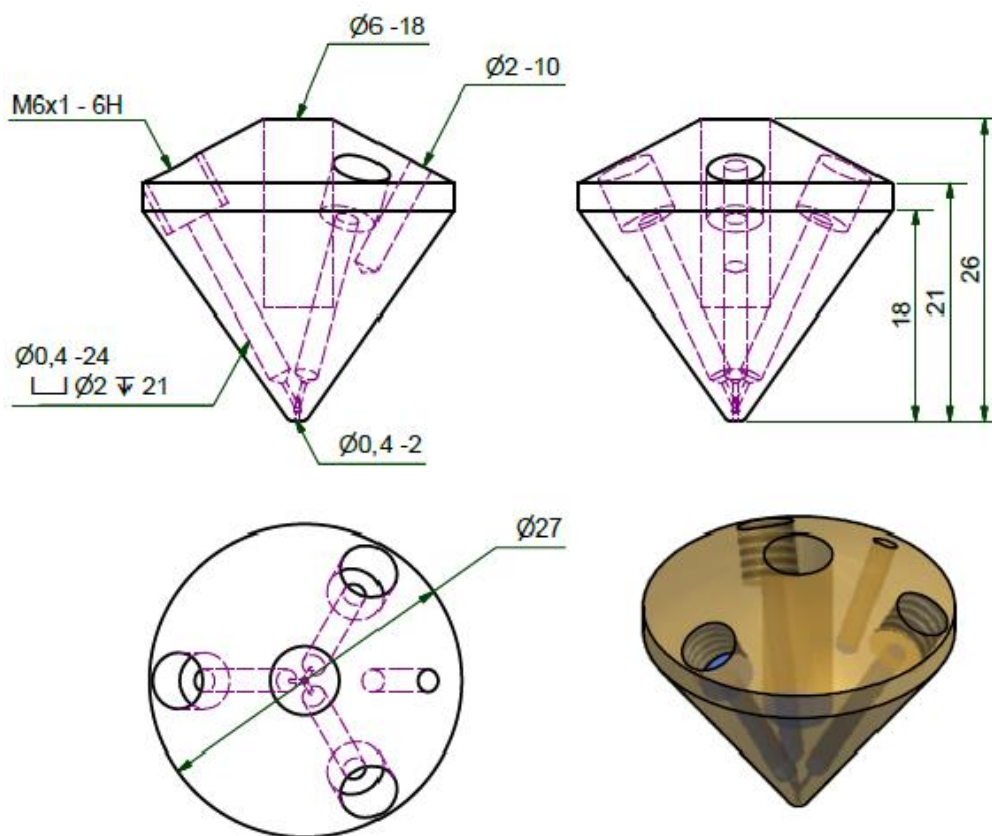
Obr. 14 Trojnásobná tryska model Diamond nozzle [37].

Model Diamond je jedním z nejvíce diskutovaných kombinovaných hot endů. Jedná se o celokovový hot end, který maximálně využívá prostoru a zjednodušení tvarů pro potřeby výrobitelnosti a designu. Jeho výhodou je kompaktní provedení, lehká kalibrace, kompatibilita s velkou škálou RepRap strojů, možnost míchání barev. Tento typ hot endu je zobrazen na předchozím obrázku 14. [38]

Parametry modelu Diamond [38]:

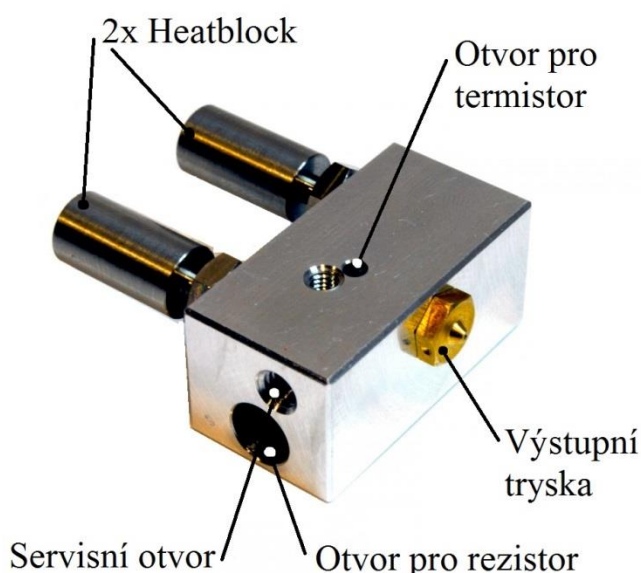
- materiálem těla trysky je mosaz,
 - Jde o blíže nespecifikovaný materiál, kde je uvažován kompromis mezi dobrou tepelnou vodivostí, výbornou obrobitelností, dobrou oteruvzdorností a dobrou korozivzdorností.
- 3 vstupy pro tiskové struny Ø 1,75 mm,
 - Vstupy pro tiskové struny jsou opatřeny závity pro připojení nerezové trubičky, jenž je osazena krčkem viz kapitola Cold end

- 1 kombinovaný výstup s výstupní tryskou $\varnothing 0,4$ mm,
 - Pro jiný průměr je nutno volit celý nový hot end. V případě opotřebení výstupu trysky je také třeba kompletní výměny.
- minimální tavící komora,
 - Tavící komoru diamondu si lze prohlédnout na obrázku pod testem (obr. 15). Minimální prostor zaručí minimum zbytkového materiálu a rychlou změnu materiálu tisku. Vlivem rychlé výměny materiálu v komoře zde také nedochází k přehřátí materiálu, v opačném případě by mohly vznikat bubliny v materiálu a další defekty způsobené spékáním materiálu.
- celokovové provedení,
 - Tato varianta je jen obtížně čistitelná.
- vyhřívání 40W rezistorem,
 - Rezistor je vložen v ose a vyhřívá tak všechny 3 části shodně.
- celková hmotnost tiskové hlavy osazené tryskou Diamond je cca 250 g.
 - Do této váhy je započteno veškeré příslušenství: tělo trysky, rezistor, termistor, cold endy, větrák, připevňovací mechanismus.



Obr.15 Schematický výkres vrtání trysky Diamond [38].

Model Cyclop je kombinovaný hot end, kde na vstupu jsou dvě tiskové struny a výstup tvoří jedna vyměnitelná tryska. Jedná se o hot end tvořený z více částí. Vzhledem ke konstrukci tavící komory je třeba vyvodit většího tlaku přiváděnými tiskovými strunami. Výrobce také upozorňuje na nutnost přítomnosti obou tiskových strun. V případě přítomnosti jedné struny se natavený materiál vydá cestou menšího odporu, a to cestou chybějící struny, kde v cold endu zatuhne a znemožní další tisk. V tomto případě je nutné hot end rozebrat a vyčistit. Při prvním tisku je nutné obě struny zatlačit co nejdéle hot end umožní. Dále je zde doporučeno při tisku s výměnou strun nastavit v ovládacím software zpětné povytažení již nepoužívané struny cca o 1 – 2 mm. Tímto opatřením se zabráni přebytečnému vytékání materiálu ve formě vlákna, způsobeného zbývajícím tlakem předchozího materiálu a zároveň nového materiálu. Pro čistší střídání barev je doporučeno stavět souběžně s výtiskem i takzvanou věž, která se staví souběžně s tištěným dílcem a kde se otírá přechodový materiál. Lepších výsledků bylo dosaženo tiskem z materiálu PLA, než z ABS. Náhled na hotend Cyclope je (obr. 16).



Obr. 16 Cyclop hot end [39].


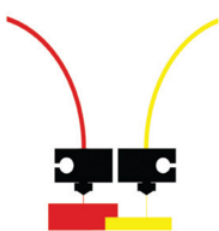

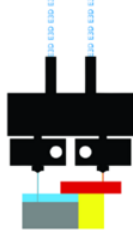
Parametry modelu Cyclope [39] [40]:

- materiálem ohřívacího bloku je slitina hliníku,
 - Jde o blíže nespecifikovaný materiál, kde je uvažován kompromis mezi dobrou tepelnou vodivostí, výbornou obrobiteľnosť a dobrou korozivzdorností.
- 2 vstupy pro tiskové struny Ø 1,75 mm,
 - Vstupy pro tiskové struny jsou opatřeny závity pro připojení nerezové trubičky, jenž je osazena krčkem viz. Kapitola Cold end.

- vyměnitelná tryska,
 - Vyměnitelná tryska umožňuje lepší dostupnost do tavicí komory pro potřeby čištění. Umožňuje změnu průměru tištěného vlákna zašroubováním trysky o jiném průměru výstupu.
- tavicí komora,
 - Tato tavicí komora má dobrou dostupnost, za cenu velkého prostoru. To má za následek setrvačnost tisku, přehřívání materiálu a potřebu správného nastavení tisku s reverzací posunu tiskové struny. Komora je z obou stran otevřená a uzavíratelná šroubem a přitlačnou kuličkou. Detail bloku je vidět na výkrese v příloze dokumentu.
- vyhřívání 40W rezistorem.
 - Rezistor je umístěn kolmo na trysku.

Porovnání a znázornění jednotlivých principů je zobrazeno v následující ilustrované tabulce (tab. 1.2). Prvním příkladem společnosti E3D – Online je model E3D-v6, jednoduchý hot end umožňující tisk 1 materiálem. Druhým příkladem je model Chimera, která umožňuje tisk 2 materiály s nezávislou teplotou jednotlivých hlav. Výše zmíněná varianta Cyclops umožňuje tisk ze dvou materiálů o stejné teplotě tavení. Oproti předchozímu modelu umožňuje smísit materiály a dosáhnout tak plynulých přechodů mezi materiály. Poslední porovnávaný je model Kraken, který má 4 výstupní trysky jak je vidět na (obr. 14). Umožňuje tisk ze 4 typů materiálů. Tento model má oproti předchozím největší rozměry a lze jej efektivně chladit vodním okruhem. Poslední 3 modely jsou doporučovány přivádět materiál bowdenem. U prvního modelu lze užít podávání na přímo i bowdenově [40], [41].

Tab. 1.2 Příklady tiskových hlav se základními parametry [41].

Typ modelu	E3D-v6	Chimera	Cyclops	Kraken
Znázornění				
Vstupní mat.	1	2	2	4
Výstup mat.	1	2	1	4
Míchání mat.	ne	ne	ano	ne
Individuální t.	ano	ano	ne	ano
Typ chlazení	vzduch	vzduch	vzduch	vod
Cena	£55.00	£80.00	£90.00	£135.00

1.2.5 Podávání materiálu

Materiál pro tisk je možné dodávat buď v sypké formě, nebo ve formě tiskové struny. Pro běžného uživatele je používanější varianta podávání materiálu formou tiskové struny. Tisková struna se nazývá filamentem. Struna je podávána pomocí krokového motorku řízeného softwarově. Pro nastavení rychlosti podávání materiálu je zpravidla dohledatelné doporučení udávající kolik mm vlákna má být vytlačeno při určitém množství kroků. To se však může nepatrně lišit u jednotlivých strun a je proto třeba při výměně provádět kalibraci. Na stejnou rychlost posuvu je možné podávat i více materiálu, čímž se docílí většího průměru výstupního vlákna a plnějšiho tisku, nebo naopak. Tato synchronizace je spolu s řízením teploty velmi důležitá, aby došlo k plnohodnotnému tisku a jednotlivá vlákna se dobře propojila s ostatními vlákny. Na podávání materiálu formou struny je vyvinuto hned několik přístupů. Nejznámějšími z nich jsou takové, kde tisková hlava přímo obsahuje krokový motorek pro podávání struny s převodovým mechanismem, nebo podávání materiálu řešené bowdenovým vedením [42].

Tisková hlava s přímým podáváním

Tento typ znamená, že tisková hlava je osazena krokovým motorem a podávacím zařízením. Často je toto podávací zařízení převodováno mechanismem, díky kterému je dosaženo přesnějšího podávání množství materiálu, nebo je možné instalovat menší motor s vhodnými parametry, čímž se dosáhne určité redukce váhy při dosažení stejné síly. Při této variantě nedochází k předpružení vlákna a jedná se o přesnější variantu. U tisku vícero tiskovými strunami se toto řešení neosvědčuje především díky zvýšení hmotnosti tiskové hlavy, tím i setrvačných sil. Také je zde problém zvětšení tiskové hlavy což má za nežádoucí následek zmenšení tisknutelného objemu [42].

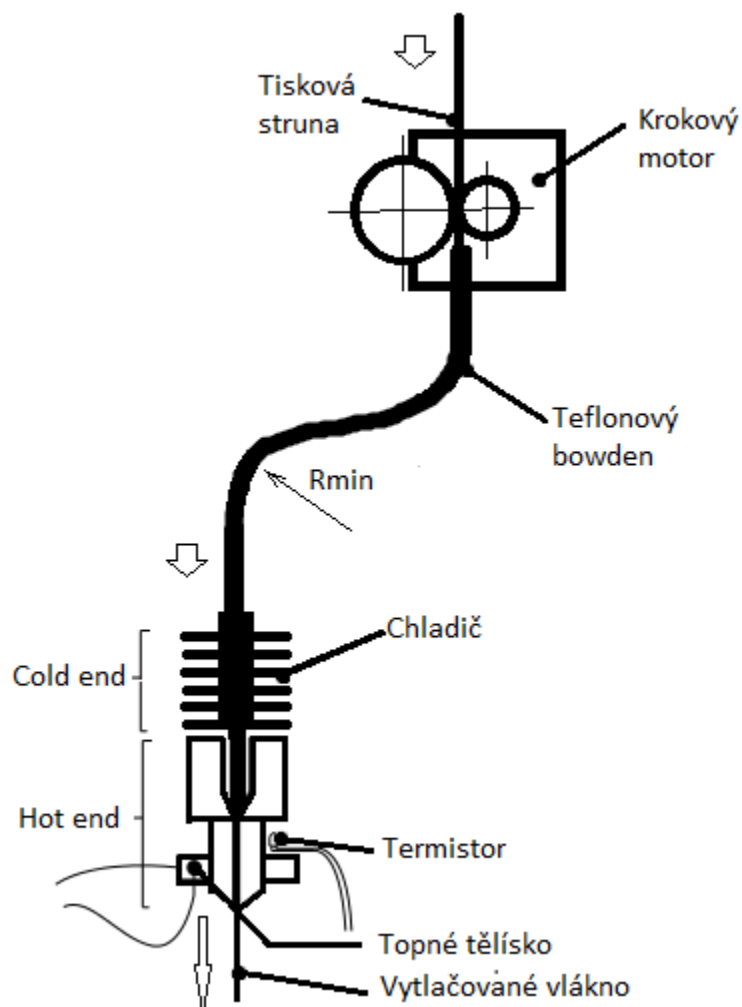
Tisková hlava - bowdenové provedení

Bowdenové provedení znamená umístění krokového motoru s podávacím zařízením tiskové struny mimo tiskovou hlavu. Toto zařízení je umístěno buď na pevném rámu tiskárny, nebo externě. Toto nepřímé provedení je s tiskovou hlavou propojeno hadičkou nazývanou bowden. V bowdenu se tlačí tisková struna do tiskové hlavy, kde je následně tavena. Pro hadičku, tedy bowden, je využíván materiál polytetrafluorethylen (PTFE) nazývaný teflon. Pro toto využití má teflon nesporné výhody. Jeho hlavní předností je nízký součinitel tření, teplotní stálost do 250°C a jeho zařazení mezi nehořlavé polymery [43].

Hlavní předností této konstrukce je snížení hmotnosti tiskové hlavy. Tím je docíleno snížení setrvačných sil. Setrvačné síly zde vznikají rychlými změnami směru, které jsou pro 3D tisk typické. Snížením hmotnosti je možné zvýšit rychlost tisku a trvanlivost stroje. Další výhodou je možné zmenšení tiskové hlavy a tím získání většího prostoru pro pohyby trysky a tedy i možnosti tisku větších dílců. Dále je díky tomuto řešení možno tiskovou hlavu osadit více tryskami viz model Diamond a Chymera [41].

Stinnou stranou bowdenového vedení je především menší tuhost vedení struny a z toho i vyplývající menší možná přitlačná síla vyvozená strunou do tavícího prostoru hot endu. Toto je možno částečně omezit použitím teflonové trubičky s vhodnou světlostí vůči průměru tiskové struny, ale i tak je možná nižší maximální rychlost tavení struny. Struna se rovněž hůře zavádí. Teflonová trubička zvládne

nečekaně malé ráduisy s pomalým nárůstem třecího odporu. Schéma bowdenového provedení je zobrazeno na následujícím obrázku (obr. 17) [44].



Obr. 17 Bowdenoivé provedení tiskové hlavy.

1.3 Tiskové materiály

Materiál pro FDM tisk je velmi diskutovanou oblastí, a to nejen v oblasti RepRap, ale i u komerčně prodávaných strojů. Jeho kvalita přímo ovlivňuje kvalitu výsledného tištěného dílce a schopnost tiskárny tisknout komplikovanější tvary, jakými jsou různé převisy či tzv. mosty. Most je označení pro vlákno natažené bez podpory mezi 2 body. Představit si to můžeme například při tvorbě nepodepřeného okenního překladu. Zde je nutné, aby se vlákno netrhlo a drželo tvar. Příznivé vlastnosti tiskového materiálu jsou stejnorodost, materiálová i tvarová a další dle doplňujících konkrétních požadavků. Nežádoucími vlastnostmi je tepelná dilatace, špatná přilnavost k podložce, trhavost vlákna, bublinky a podobně [45].

Tisková struna je vyráběna z granulí požadovaného materiálu. Před tavením a tvarováním do formy filamentu je nezbytné provést několik operací. Jednou je přidání přísad pro dosažení požadovaných materiálových vlastností, jako je rázová houževnatost, magnetické vlastnosti, barevný odstín a další. Všechny přísady se

důkladně promíchají a následuje sušení. Sušení probíhá v teplotním rozsahu mezi 60°C a 80°C. Tato operace je opravdu nutná pro odstranění vlhkosti ze struny, která by vykazovala špatné tiskové vlastnosti, jakými jsou například tvorba bublin, až trhání vlákna při samotném tisku. Jedná se pravděpodobně o největší příčinu špatných vlastností materiálu. Po sušení se přejde k tavení a extruzi tiskové struny v požadovaném průměru. Nejčastěji využívané průměry jsou 1,75mm a 3mm. Jakmile je průměr vytlačen následuje chlazení v horké vodní lázni, kde je vlákno rovnáno a kalibrováno. Po zchlazení následuje laserová kontrola průřezu a namotávání na cívky. Cívky s tiskovou strunou na (obr. 18) [14], [46], [47].



Obr. 18 Tiskové struny a ukázka barevných variací [48].

Pro samotný tisk je používáno mnoho druhů termoplastických materiálů a na trh přicházejí stále nové materiály a jejich upravené modifikace. V komunitě RepRap se diskutéri zmiňují o rozdílnosti stejných materiálů od různých výrobců. Při změně výrobce je obecně doporučeno provést základní testy tisku materiálu.

1.3.1 Vybrané materiály

ABS (akrylonitril butadien styren)

Dle statistického zhodnocení zdroje 3DHubs je ABS nejpoužívanějším materiálem do FDM tiskáren. Tento materiál je pro 3D tisk dostatečně tuhý a zároveň odolá nízkým i vysokým teplotám. Také je odolný vlivu chemikálií. Je však rozpustný v acetonu, čehož se využívá pro zahmlení povrchových vrstev výtisku. Po odpaření rozpouštědla takto ošetřený výrobek vytvrdne a má zpravidla lesklý povrch. Při tisku z ABS dochází ke značné teplotní roztažnosti a při následném chlazení ke smrštění, což vede ke vzniku kroucení a deformací. Z tohoto důvodu není doporučován pro tisk velkých výrobků v otevřených tiskárnách, bez termoregulace prostoru tisku. Na trhu se vyskytuje v mnoha variacích. U ABS je zmiňována teplota pro tisk mezi 220-240°C, vhodné je však začít na 230°C a dle viskozity vlákna měnit teplotu tisku. Pro tento typ materiálu je doporučen tisk na upravenou vyhřívanou podložku o teplotě 105-115°C. Vhodné je začít tiskem podkladné mřížky, která zabezpečí přilnavost k podložce. Vzhledem k vysoké teplotě tavení lze tento materiál strojně brousit, vrtat a obrábět konvenčními technologiemi. Vlastnosti tohoto materiálu jsou vhodné i pro finální dílce a je hojně využíván u RepRap tiskáren k tisku náhradních dílů, nebo tiskáren dceřiných. Náhled vlastností pro tisk je obsažen v (tab 1.3) [46], [47], [49].

Tab. 1.3 Tiskové parametry materiálu ABS [50].

Název parametru	Hodnota
Max. velikost objektu	80mm
Teplota pro základní mřížku	235°C
Teplota pro Interface	235°C
Teplota pro tisk - První vrstva	225°-235 °C
Teplota pro tisk - Běžné vrstvy	240°-248 C
Rychlost tisku - malé objekty (do 80mm)	6-20mm/s
Rychlost posunu extruder - malé objekty	26-36 mm/sec
Rychlost tisku - větší objekty	0-12 mm/sec
Rychlost posunu extruderu - větší objekty	16-22 mm/sec

PLA (Polylactic acid, nebo také kyselina polymléčná)

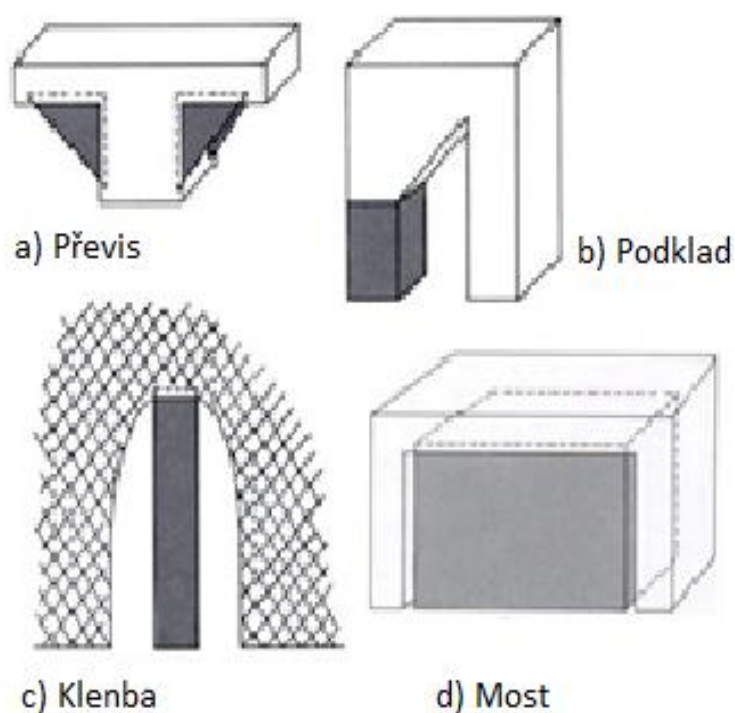
PLA je dle zmíněných statistik 3DHubs druhý nejpoužívanější materiál metody FDM. Jedná se o univerzální tiskový materiál, jehož největší výhodou je minimální tendence ke kroucení. Je to dáno minimální teplotní roztažností. Jeho zpracování je rychlejší a snadnější než u ABS. Na druhou stranu není tak odolný proti teplotním změnám a je křehčí. Začíná měknout kolem 60°C. Díky tomu dochází při broušení k jeho natavení a je třeba brousit ručně nebo užít chlazení. Lze jej snadno vrtat či lakovat barvou pro tvrdé plasty. 3D výrobky z PLA jsou ekologicky šetrnější, protože materiál je vyroben z biologicky odbouratelných zdrojů. Je vyráběn z přírodních zdrojů škrobu, jakými jsou kukuřice, cukrová třtina a brambory. Díky svým mimořádným vlastnostem je využíván se stále větším zastoupením a je doporučován začátečníkům 3D tisku. Přehled doporučených technologických nastavení pro použití viz (tab. 1.4) [49], [14].

Tab. 1.4 Tiskové parametry materiálu PLA [51].

Název parametru	Ho nota
Max. velikost objektu	není
Teplota pro základní mřížku	195°
Teplota pro In erface	195°C
Teplota pro tisk - První vrstva	200°C
Teplota pro tisk - Běžné vrstvy	210°-2 0°
Rychlost tisku - malé objekty (do 80mm)	až 30mm/s
Rychlost posunu extruder - malé objekty	až 34 mm/sec
Rychlost tisku - větší objekty	20 mm/sec
Rychlost posunu extruderu - větší objekty	28 mm/sec

HIPS (high impact polystyrene)

Jedná se o copolymer s podobnými vlastnostmi materiálu ABS, ale s tím rozdílem, že je rozpustný v limenonu. Díky tomu je HIPS využíván jako forma podpor. Limenon je biologicky odbouratelný materiál vyráběný z oleje zrn citrusů. Vytisknutý polotovar s podporami je namočen na cca 2 hodiny do limenonu, jakmile HIPS změkne, tak jej lze bezpečně odstranit od ABS, které nezmění své mechanicko - fyzikální vlastnosti. Podpory (obr. 19) se využívají k tomu, aby umožnily tisk, popř. zvýšily jeho kvalitu. HIPS je taven za teplot 200°-210°C a doporučená teplota vyhřívání podložky 90°-115°C [14], [49].



Obr. 19 Užití podpor [14].

2 NÁVRH 3D TISKÁRNY

Pro účely ověření funkce a testy duální tiskové hlavy je nutno pořídit testovací 3D tiskárnu. V dnešní době, i díky projektu RepRap, je na trhu velké množství dostupných tiskáren. Pro správnou volbu tiskárny si je nutno uvědomit požadavky, které jsou na požadovaný stroj kladeny, a také možnosti kupujícího.

požadavky:

- Tiskárna typ RepRap
- Jednoduchá a tuhá konstrukce tiskárny
- Možný tisk z dostupných materiálů (ABS, PLA)
- Dostupné náhradní díly
- Kladné reference
- Upravitelnost
- Pořizovací cena do 12 000,- Kč včetně DPH

Cenovému parametru vyhovují stavebnice tiskáren, nikoli tiskárny sestavené. Jedná se o typy RepRap, při nichž začíná uváděná cena kompletní stavebnice 3D tiskárny na 8 829,- Kč. Konkrétně je za tuto cenu v nabídce Průša i3 Heacent. Tato nabídka však není prodávána originálním výrobcem Josefem Průšou, ale je dodávána doručovací společností z internetového portálu www.dx.com s nejasným výrobcem a zemí původu. Dále jsou k dostání použité stroje, například stejný model tiskárny Průša i3 Heacent, tentokrát ovšem plně složený a k dostání na aukčním portálu www.aukro.cz za 12 000,- Kč, vč. základního zaškolení. Josef Průša - autor a výrobce těchto tiskáren, prodává nejlevnější tiskárnu za 16 990,- Kč, což je model Průša i3 plus (obr. 20). Tento model je navíc doplněn o LCD displej a technickou podporu [52].



Obr. 20 Tiskárna Průša i3 plus s LCD [52].

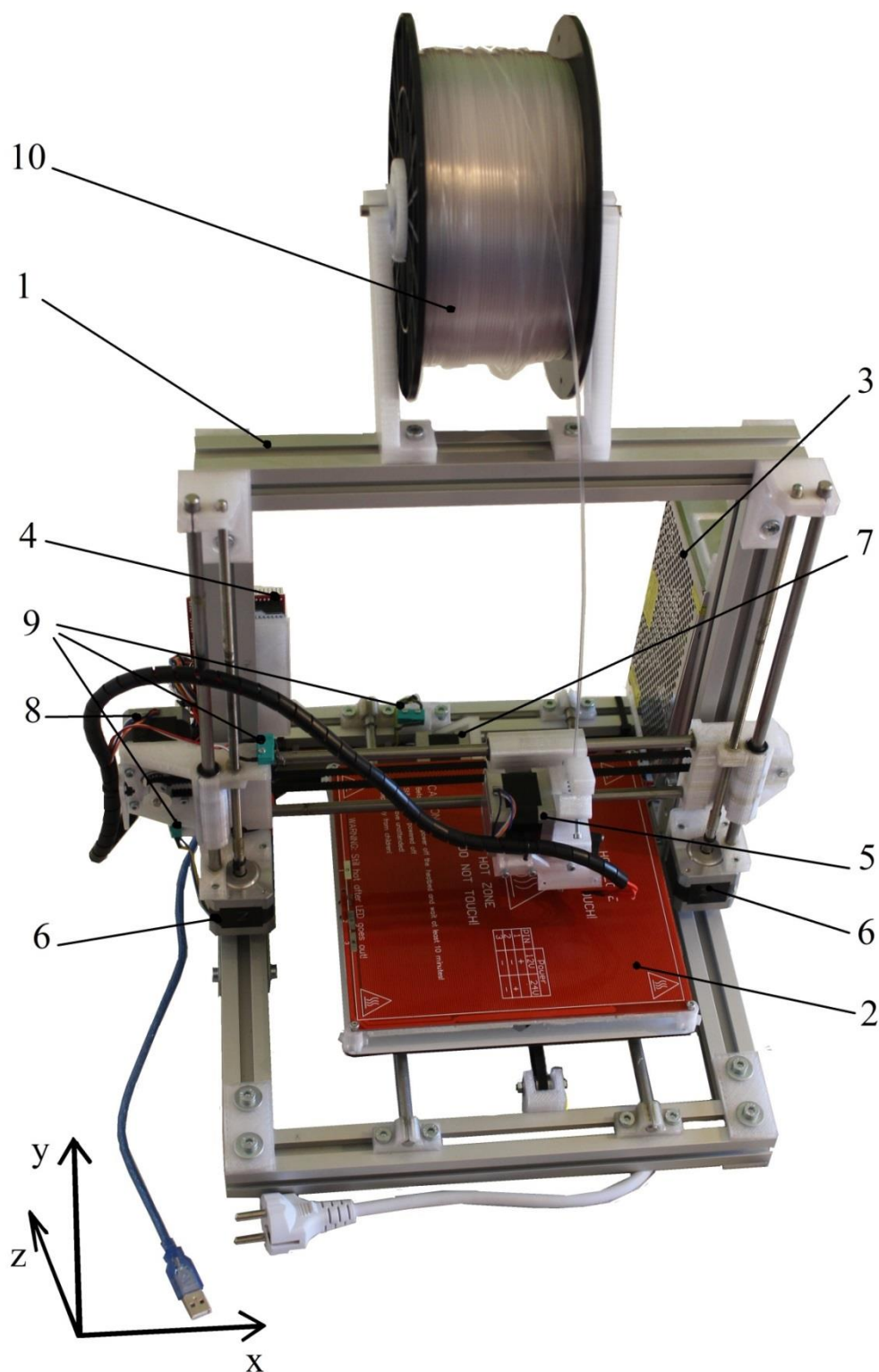
Vhodnou tiskárnou dle zadaných parametrů je 3D tiskárna Rebel II, která taktéž pochází od českého autora, a to Daniela Lence. Tento autor provozuje také internetové diskusní fórum www.rebelove.org, kde je zcela zdarma dostupná kvalitní podpora. Podporu poskytuje autor Daniel Lenc a také silná komunita uživatelů této tiskárny. Dle autora je možné tuto tiskárnu sestavit v ceně kolem 10 000,- Kč, při koupi jednotlivých dílů, například v autorově internetovém obchodě viz <http://obchod.rebelove.org>, nebo na www.ebay.com. Kompletní stavebnici tiskárny Rebel II lze také pořídit v obchodě JRC Czech a.s. (www.JRC.cz). Je zde nabízena od základního modelu za 10 790,- Kč. Nejvyšší model, který je doplněn o nářadí, kalené pojezdové tyče, LCD displej, čtečku SD karet a SD kartu, stojí 12 290,- Kč. Ve vybraných kamenných obchodech je tato tiskárna sestavena a je možné si ji před koupí prohlédnout. <http://obchod.rebelove.org> [53].

2.1 3D tiskárna Rebel II

Tato tiskárna vychází z tuhé konstrukce tvarových profilů z hliníkové slitiny. Je k množství dílů a velikosti tiskového prostoru, poměrně kompaktní a téměř vše je logicky uspořádáno, včetně vedení kabelů. Na portálu www.rebelove.org je vždy k dispozici aktuální vylepšená verze. Tyto úpravy provádí celá komunita, včetně autora. Vylepšení se týkají také dílů, jenž si může tiskárna sama vytisknout a tím se zdokonalit. Tiskárna je i s popisem vyobrazena na obrázku následující stránky (obr 21).

Základní parametry dle prodejce:

- rozměr tiskové plochy: 190x190x180mm (skutečný minimální tiskový objem. Lze tisknout i o něco málo větší objekty),
- rychlost tisku: běžná 120mm/sec, kvalitní tisk 60mm/sec, maximální 250mm/sec,
- průměr struny: 1,75mm,
- průměr trysky: 0,4mm,
- tisk ze všech běžných materiálů strun,
- krokové motory 1x0,5Nm + 4x 0.3Nm, 11x kuličkové ložisko pro lineární posun, nerezové vodící tyče,
- drivery DRV 8825 (32 mezikroků, tj 6400/ot),
- rozlišení osy X a Y je 6,25μm. Osa Z má rozlišení 0,15625μm,
- vyhřívaná tisková plocha, tisk na zrcadlo 3mm (součástí stavebnice),
- všechny vodiče mají profesionálně nakrimpovány konektory/dutinky,
- nainstalovaný open source firmware Repetier,
- nářadí ke stavbě je součástí stavebnice,
- tištěné díly jsou předvrtány pro snadnější montáž a příslušné díry mají nařezán závit.
- podrobný návod ke stavbě. Mechanické sestavení stavebnice trvá dle zručnosti 10 - 30 hodin. Návod není dodáván v tištěné formě. Je však dostupný z <http://www.jrc.cz/kestazeni3d> [54].



Obr. 21 Zkompletovaná stavebnice Rebel II.

Popis: 1) Rám 3D tiskárny, 2) Vyhřívaná podložka, 3) Napájecí zdroj, 4) Elektronika, 5) Tisková hlava, 6) Krokové motory osy z, 7) Krokový motor osy y 8) Krokový motor osy x, 9) Koncové spínače 10) Tisková struna.

2.1.1 Rám tiskárny

Rám je sestaven z profilů hliníkové slitiny. Je tvořen z profilů systému kombi. Tyto profily se spojujícími prvky, jakými jsou tvarové matice a šrouby s vnitřním šestihranem, jsou rychle a pevně sestavitelné, polohovatelné a opětovně rozebíratelné. Tato konstrukce je výhodná, jelikož umožňuje úpravy, a také upevňování libovolných doplňků. Vzhledem, tomu, že se jedná o hliníkovou slitinu, tak je rám korozivzdorný, tuhý a nepříliš těžký [55].

2.1.2 Vyhřívání podložka

Často nazývaná „hot bed“ z anglického jazyka. Vyhřívání podložka (obr. 22) zlepšuje přilnavost tištěného materiálu k podložce a u některých materiálů dokonce umožňuje tisk, který je jinak díky nepřilnavosti první vrstvy nemožný. Například materiálem ABS na podložku bez vyhřívání tisknout nelze. Vyhřívání podložka zároveň snižuje teplotní rozdíly modelu během tisku a omezuje tak jeho deformace způsobené tepelným smršťováním. Pro tisk termoplastů je považována za běžnou součást tiskárny a lze ji vynechat pouze v některých případech. Na tuto podložku se doporučuje položit sklo, či zrcadlo, odrazovou stranou vzhůru, pro lepší rozvod tepla po desce. Tato zrcadlová podložka má také hladký, rovný a odolný povrch, který je pro kvalitní tisk nezbytný. Pro zlepšení přilnavosti je možné nalepit kaptonovou pásku, nebo potříit tenkou vrstvou takzvaného ABS juice, což je rozpuštěný materiál ABS v acetonu [56].



Obr 22 Vyhřívání podložka.



Obr. 23 Kamnářská páska.

Dodávaná podložka od JRC je vybavena termistorem upevněným ve středu podložky a napájecími kabely odpovídajícího průřezu. Velký průřez je nutný z hlediska vysokého proudu, který dosahuje 10A. Doporučená teplota podložky pro tisk s ABS činí 110°C, na tuto teplotu se však za pokojových podmínek dostane limitně a v čase 26 min. Přes tuto teplotu se však není schopná sama dostat. Urychlení ohřevu je možno provést nehořlavou kamnářskou páskou (obr. 23). Zateplení je provedeno dvěma vrstvami křížně a je instalováno na zařízení 1 rok bez známek degradace. Výsledkem je podstatné zkrácení času

ohřevu a zvýšení maximální teploty stolu. Na teplotu 110°C se nyní vyhřívána podložka dostane za 9 min a 23 s. Díky zateplení se také zvýšil maximální teplotní rozsah ze 110 °C na 118°C. Pro zvýšení výkonu vyhřívané podložky je také možné přenastavit dodávaný zdroj pomocí implementovaného trimru na 12,5V. Pro některé materiály například ABS je nutno po tisku nechat vychladnout tiskový stůl, jinak nelze výrobek odlepit [53], [56], [20].

2.1.3 Napájecí zdroj 3D tiskárny

Napájecí zdroj je v podstatě měnič napětí. Požadovanou funkcí je přeměnit střídavé napětí ze sítě (230 V / 50 Hz) na napětí 12 V stejnosměrné. Komponenty 3D tiskárny odebírají určité množství proudu a na to musí být napájecí zdroj dimenzován. Porucha zdroje může způsobit zničení dalších komponent. Jeho podoba je zobrazena na (obr. 24).



Obr. 24 Průmyslový napájecí zdroj typu: SP - 250 W.

Parametry napájecího zdroje [57]:

- max. příkon 250W,
- výstupní napětí 12V,
- max. výstupní proud 21A,
- pasivní chlazení.

2.1.4 Elektronika

Elektronika hraje ve 3D tiskárně nezastupitelnou roli. Je to soubor mnoha komponent, které slouží pro ovládání 3D tiskárny. Pomocí ní lze synchronizovat příkazy a faktické pohyby, změny teplot, polohování a zpětnou vazbu. Prostřednictvím USB kabelu umožňuje propojení se síťovou kartou PC. Elektrickou energii jí dodává napájecí zdroj. Skládá se z hardware a firmware. Hardware jsou fyzické komponenty a firmware je program nahráný přímo do sofistikovaného zařízení. Firmware je většinou dostupný na stránkách výrobce hardware. Zde u tiskárny Rebel II jsou ke stažení například na této adrese www.jrc.cz/kestazeni3d. Elektronika se skládá z Procesoru, kabeláže, čidel, různých ovládacích modulů a dalších [53], [54].

Arduino mega2560

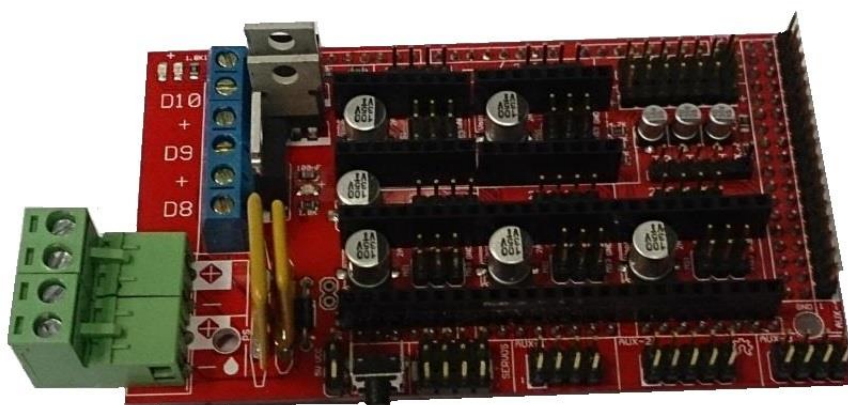
Arduino Mega2560 (obr. 25) je univerzální procesorová deska jednotka, která je vybavena napájecími konektory pro různé moduly. Ve 3D tiskárně REBEL II má za úkol kompletní řízení tiskárny, komunikaci s počítačem, popřípadě i displejem a SD kartou, i všechna čidla. Arduino je možno napájet USB konektorem, nebo z napájecího zdroje. To slouží pro tisk přes SD kartu v případě, že není tiskárna propojena s PC přes USB. Tato deska je schopna pracovat se vstupním napětím 6-20 V, doporučeno je však pohybovat se mezi 7-12 V. V Arduino Mega2560 dodávaném společností JRC Czech a.s. je nahráný firmware pro REBEL II. Odkazy na oficiální stránky Arduina i firmware naleznete na www.jrc.cz/kestazeni3d. Do Arduina přijde připojit Ramps 1.4 [58].



Obr. 25 Arduino_mega2560.

Ramps 1.4

Jedná se o modul určený pro procesorové desky Arduino. Jeho funkcí je zprostředkovat rozhraní mezi procesorem a jednotlivými částmi tiskárny. Dle prodejce JRC Czech a.s. je originální FET tranzistor určený pro vytápění vyhřívané podložky poddimenzovaný. Do vyhřívané podložky vede proud přibližně 10 A a pracovní teplota tranzistoru se pohybuje přes 80°C. Tímto odůvodňují jeho výměnu za tranzistor IRF1404. Ten má v sepnutém stavu odpor 0.004 Ω a zůstává stále studený. Nižší teplota znamená delší výdrž tranzistoru. To má za důsledek snížení spotřeby tiskárny a urychlení ohřevu vyhřívané podložky. Jak je možné se dočíst na diskusních portálech RepRap, tato výměna je obecně doporučována. Důvodem je nedostatečné vyhřívání podložky, a dále samovolné ukončení tisku, ke kterému bez této výměny dochází [59], [20], [60]. Ramps 1.4 na (obr. 26).



Obr. 26 Ramps 1.4 [60].

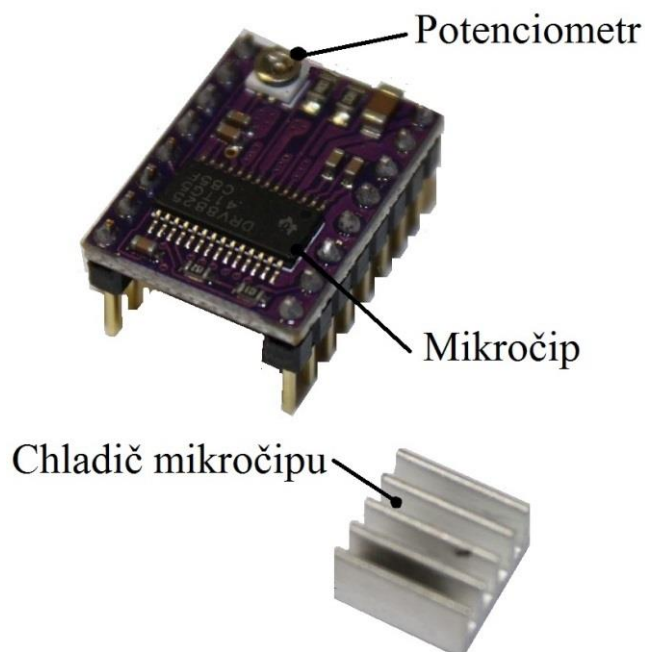
Driver krokového motoru DRV 8825

Tento driver motoru je připojen na patici ramps 1.4 a je řízen procesorem, zde konkrétně základní deskou Arduino. Spíná proud do jednotlivých cívek krokového motoru. Od procesoru zpracovává příkazy krok vpřed, krok vzad a vypni/zapni proud do motoru. Každý motor vyžadující vlastní ovládání potřebuje přiřazený driver. V tiskárně Rebel II jsou v základu nezbytné 4 drivery. Jeden driver ovládá podávání tiskové struny. Další dva ovládají po jednom driveru a motoru osu x a y. Poslední driver slouží k ovládání dvojice stejnoběžných motorů osy z [61].

Model DRV 8825, patří k nejnovější generaci driverů. Nově umí rozdělit jeden krok motorku na dalších 32 mezikroků. To vede ke zvýšení přesnosti, ale i ke snížení hlučnosti krokových motorů. Potenciometr na obrázku slouží k nastavení proudu dodávaného motorku. Před začátkem tisku je potřeba nastavit na nejmenší možnou velikost. Toto opatření sníží hlučnost, přehřívání motorů, ale i jejich sílu, která by v případě kolize tiskárny s vnějším tělesem, mohla zařízení poškodit [61].

Společně je k driveru přibalen chladič. Pro motory do proudu 1A není potřeba tento chladič osazovat. S osazeným chladičem zvládne driver proud 2A.

Při nalepování chladiče je nutno použít kvalitní teplovodivé lepidlo, aby se díky vibračním chladič neutrl a nezkratoval elektroniku. Možno použít například dvousložkové lepidlo na bázi stříbra Arctic Silver™ Thermal Adhesive [61][62]. Driver zobrazen na (obr. 27).



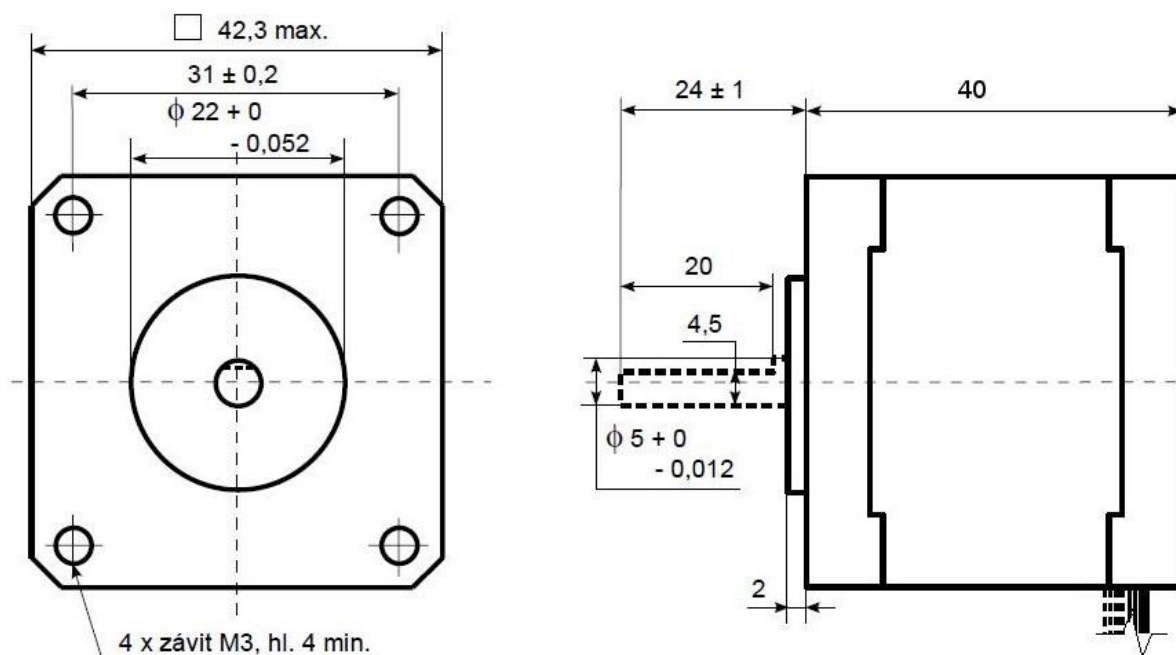
Obr. 27 Driver DRV 8825 a chladič.

2.1.5 Krokové motory

Krokové motory jsou základním prvkem pohonu 3D tiskárny. Jejich výkon udává celkové možnosti tiskárny. Krokové motory této série mají udáno $1,8^\circ$ na krok. To znamená počet kroků na jedno otočení hřídele je roven 200. Krokové motory jsou však řízeny drivery, které jsou schopny mechanické rozdělení jednotlivých kroků těchto motorů rozčlenit na dalších 32 kroků. Z toho plyne, že v této sestavě je tiskárna schopna pohybovat motory s 6400 kroky na 360° . Tento typ motoru je silně předimenzován, potřebný výkon pro pohyb všemi osami je zhruba 20% výkonu tohoto motoru. Dle prodejce by pro chod tiskárny stačily motory SX17 - 1003LQEF70, mající statický kroutící moment 0.3 Nm. Při jejich instalaci by tiskárna vykazovala menší hlučnost a spotřebu. Rozměry motorku jsou zobrazeny na (obr. 28) [63].

Ostatní parametry [64]:

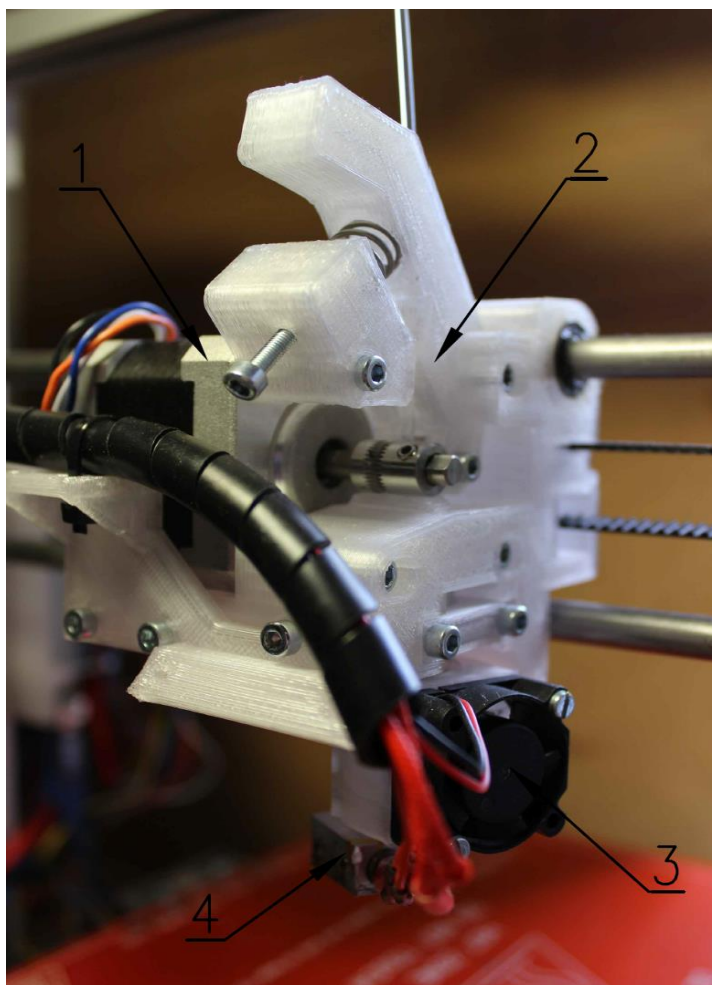
- Statický kroutící moment 0,5 Nm
- Jmenovitý proud 1 A
- Indukčnost 14 mH
- Odpor 5,8 Ω
- Zbytkový moment 0,022 Nm
- Setrvačnost rotoru 54 gcm²
- Hmotnost 0,3 kg



Obr. 28 Krokové motory SX17 - 1005VLQEF [64].

2.1.6 Tisková hlava

Tisková hlava (obr. 29) slouží k tavení, vytlačování a pokládání vlákna. Tisková hlava dodávaná k tiskárně Rebel II je stavěna na tisk z tiskové struny o průměru 1,75 mm. Výšku vrstvy lze regulovat rychlostí posuvu a rychlostí dávkování objemu materiálu. U průměrů do 1 mm obecně platí, že tiskárna je schopna tisknout vrstvu o výšce $\frac{1}{2}$ průměru trysky. Zde je dodán průměr trysky 0,4 mm. Tiskárna je tedy schopna tisknout bezproblémově vrstvu vysoké 0,2 mm. Tisková hlava tiskárny Rebel II je primárně určena k tisku jedním materiálem. Doporučeným materiálem je ABS a PLA, ale lze tisknout samozřejmě i dalšími materiály. Jedná se o tiskovou hlavu, kde je motor podávající materiál, přímo u vstupu do cold endu, tím je umožněn i tisk z pružných a poddajných materiálů, které mohou mít jinak obtíže způsobené vedením pružného materiálu. Tělo tiskové hlavy je variabilní a lze vytisknout úpravy dostupné například na stránkách rebelove.org. Příkladem úpravy může být zveřejněný model směřování proudu vzduchu procházejícího chladičem, do prostoru pod trysku, čímž optimalizuje tiskové vlastnosti. Další úpravou také může být z převodování motoru na hnací ozubené kolo.



Obr. 29 Tisková hlava 3D tiskárny Rebel II (1) Krokový motor (2) tělo tiskové hlavy (3) Ventilátor (4) Hot end.

2.1.6.1 Popis hlavních částí tiskové hlavy:

- **Krokový motor**

Motor slouží k podávání tiskové struny do tavící komory hot endu. Jak je vidět na (obr. 29), hřídel motoru je osazena ozubeným kolem, které má za úkol vytvořit v tiskové struně vlisy a zabránit prokluzu struny. Kroky motoru jsou synchronizovány s řídicím programem a je nutné, aby po nastavení tisku podával přesné množství. Popis krokového motoru viz krokové motory SX17 - 1005VLQEF.

- **Tělo tiskové hlavy**

Tělo tiskové hlavy je variabilní a lze pro něj dotisknout libovolné úpravy. Jeho podstatnou částí je přítlačná páka, které vyvíjí tlak na tiskovou strunu, která je sevřena mezi ozubené kolo motoru a tuto páku. Funkci přítlačku zde plní tlačná pružina, která je regulovatelná šroubem s vnitřním šestihranem. Tlak je vhodné

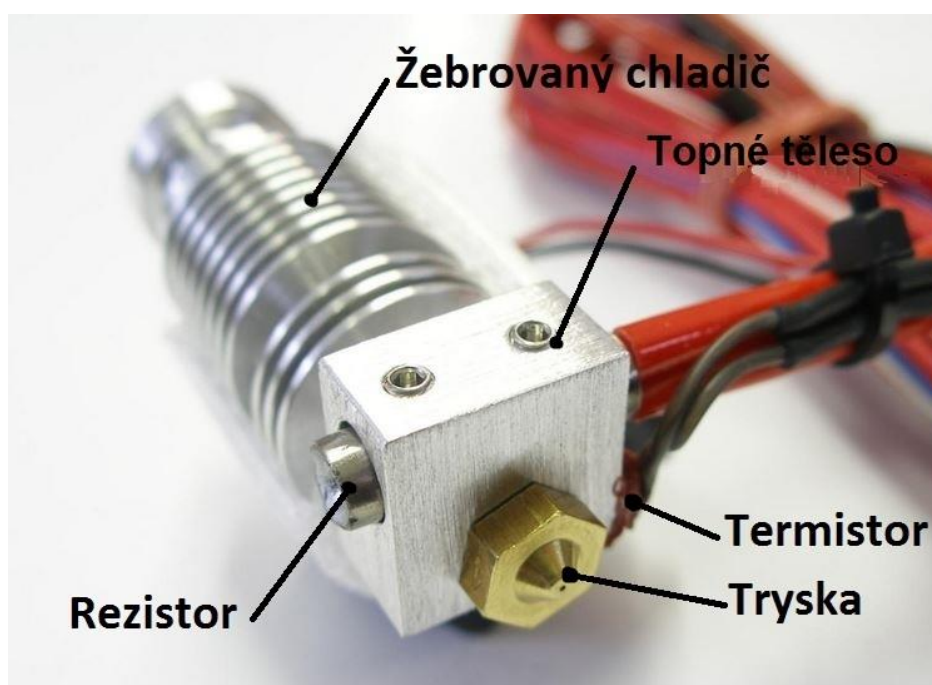
nastavit tak, aby nedocházelo ke zbytečnému porušování tiskové struny, ale musí být dostatečný, aby struna v žádném případě nepodkluzovala.

- **Ventilátor**

Ventilátor je uchycen přímo na tělo chladiče cold endu. Uchycení je funkční a směřuje tok přiváděného vzduchu přímo na chladicí žebrovaní. Ventilátor je systémově vazben na teplotu hot endu, která při předdefinovaných stupních má za příčinu, že řídicí jednotka sepne proud do ventilátoru, a ten začne chladit cold end. Tyto hodnoty jsou nastavitelné v ovládacím programu. Ventilátor dodávaný ke stavebnici je specifikován rozměry 40x40x10 mm

- **Hot end**

Jedná se o celokovový hot end, který svou konstrukcí potřebuje jako nástavbu chlazený cold end. Zobrazení této sestavy (obr. 30).



Obr. 30 Hot end.

- **Žebrovaný chladič**

Zajišťuje nízkou teplotu cold endu. Je vyroben z hliníkové slitiny, která je poměrně lehká, má hustotu přibližně $2700 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (čistý hliník) a dobře vede teplo $237 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$ (čistý hliník), čímž se materiál klasifikuje jako vhodný. K hot endu je připojen redukci, konkrétně hřídel z korozivzdorné oceli. Hřídel je opatřena znatelným zápichem, který odděluje ohřívací blok od cold endu. Minimalizováním materiálu mezi hot endem a cold endem je sníženo množství přenášeného tepla.

- **Ohřívací blok**

Ohřívací blok má za účel přenos tepla mezi rezistorem, tryskou a termistorem. Je vyroben z hliníkové slitiny podobné žebrovanému chladiči.

- **Heatbrake**

Jedná se o trubičku, která je schovaná v chladiči a zasahuje do ohřívacího bloku, mezi těmito díly je většinou proveden zápich pro minimalizaci přeneseného tepla a dřívějšímu zastavení ohřívání tiskové struny. Vnitřní průměr je velice podstatný a při jeho volbě je třeba zohlednit teplotnou roztažnost materiálu, třecí konstantu, viskozitu atd. Pro tiskovou strunu průměru 1,75 je vhodné uvažovat mezi 1,85-2,0 mm. Tato dutina musí být o velmi malé drsnosti, ideálně se musí jednat o leštěný povrch [53], [54].

- **Tryska**

Tryska udává z velké části vlastnosti, jakými bude tiskárna tisknout. Skrze ní prochází natavený materiál a tryska udává tvar a velikost výstupního materiálu. Tryska je vyrobena z mosazi, která poměrně dobře vede teplo a je dobře obrobitelná, aby šel otvor lehce vrtat. Jako součást stavebnice Rebel II byla vybrána tryska s průměrem 0,4 mm, který je všeobecně doporučován jako vhodný pro seznámení se s tiskem a pro všeobecný tisk [53].

- **Rezistor**

Jedná se o keramické topné tělísko, které udává rychlost ohřevu hot endu. Pro potřeby tisku z ABS je s výkonem 40W schopno ohřát hot end Rebelu II na 230°C za 45 sec. Toto tělísko má průměr 6 mm a je v ohřívacím bloku na pevně upnuto 2 šrouby s vnitřním šestihranem. Je určeno pro napětí 12 V. Dle vzorce (1), pro výpočet výkonu, je procházející proud přibližně 3,3 A [53].

$$P = U \cdot I [W] \quad (1)$$

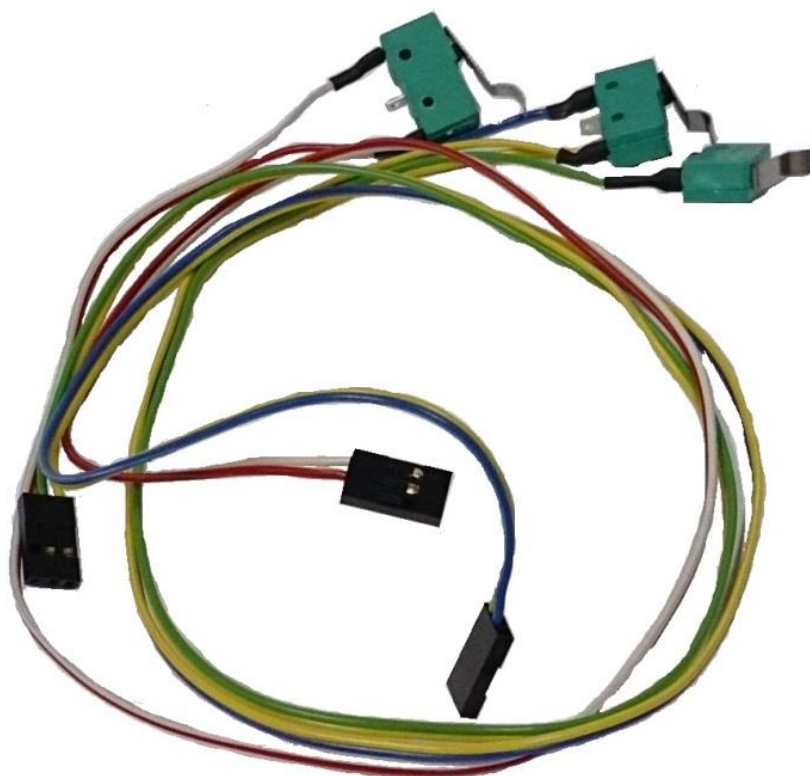
$$I = \frac{P}{U} = \frac{40}{12} = 3,333 A \quad (2)$$

- **Termistor**

Termistor je elektrický odporový článek, který slouží jako teplotní čidlo, které slouží k měření a následné regulaci teploty hot endu. Je vlepený teplovzdušným silikonem do otvoru ve vyhřívaném bloku, nejbližší k trysce, jak to jen konstrukce dovoluje. Termistor má však omezenou přesnost. Firmware tiskárny využívá extrapolaci tepelné závislosti tohoto odporu. Extrapolace znamená nalezení přibližné hodnoty v určitém intervalu. Jeden termistor je upevněn také na vyhřívané podložce [65], [66].

2.1.7 Koncový spínač

Často se lze setkat též s výrazem endstop, což je výraz přejatý z anglického jazyka. Koncové spínače (obr. 31) se v 3D tiskárnách používají k ustavení počáteční polohy. Na každou osu se používá z pravidla jeden koncový spínač. Tiskárna při parkování, nazývaném též dokování, zajede každou osou do polohy, ve které se sepne koncový spínač, který tím přeruší obvod a tím řídícímu centru dá signál k zastavení pohybu motorů a tiskárna vynuluje pozici. Touto operací tiskárna obnoví výchozí polohu, v osovém systému prostoru rozsahu pohybu se jedná o polohu nula. V řídícím programu poté nastavíme velikost stolu a tím si program nadefinuje protilehlé polohy os, které nesmí překročit. Kdyby se však cokoli stalo během tisku, stejně tak kdyby se dostalo něco do prostoru pohyblivých dílů, tak seřízení dodávaného proudu do motorů na minimum způsobí, že začnou přeskakovat kroky a tiskárna nebude vykonávat velkou sílu, kterou by se jinak mohla poškodit. Pro potřeby RepRap 3D tiskáren jsou převážně používány koncové dorazy optické, či mechanické. Koncový spínač pro tiskárnu Rebel II je mechanický [67], [68].



Obr. 31 Koncové spínače.

2.1.8 Tisková struna

Tisková struna je dodávána na cívce, ze které je odebírána krokovým motorem tiskárny. Tisk je citlivý na nečistoty na struně a rázové síly při jejím podávání. Pro odstranění nečistot je doporučeno zhotovení odstraňovače nečistot, jakým může být těsné ovinutí struny před vstupem do tiskové hlavy mechanickým stěračem. Rázy vzniklé od struny mohou být způsobeny nevyvážeností cívky se strunou, popřípadě překřížením strun. Toto může dojít, až k zaseknutí tisku. K tomuto účelu je komunitou RepRap doporučeno zhotovit brzdu cívky, která zabrání samovolnému vymotávání a povolování strun, která by se mohla křížit se spodními vrstvami [69].

3 NÁVRH 3D TISKOVÉ HLAVY METODY FDM

Duální tisková hlava je požadována pro dvoubarevný tisk. Je navržena tak, aby se minimalizovaly náklady a zajistily se optimální výsledky tisku. 3D tisková hlava je navržena ve smyslu RepRap, což znamená jednoduše vyrobitelná a aplikovatelná na stávající systém zvolené 3D tiskárny, v tomto případě Rebel II. Z tohoto vycházejí hlavní konstrukční požadavky, kterými jsou:

- Kompatibilita se stávající tiskárnou Rebel II
- Vlastní funkčnost výrobku
- Běžná vyrobitelnost
- Nízká hmotnost konstrukce
- Nenáročná montáž
- Nízká pořizovací cena

3.1 Požadavek kompatibility se stávající tiskárnou

Kompatibilita musí být zaručena po všech stránkách, bez větších zásahů do tiskárny, aby byla umožněna funkčnost a nízká pořizovací cena. Pod pojmem kompatibilita jsou myšleny 3 odvětví, a to:

- Mechanická kompatibilita
- Elektrotechnická kompatibilita
- Softwarová kompatibilita

- **Mechanická kompatibilita**

Pro kvalitní tisk, jenž je podmínkou, musí být umožněno relativně tuhé a funkční upnutí tiskové hlavy k polohovacímu mechanismu 3D tiskárny, zde se jedná o upnutí k polohovatelné ose x a z.

Relativně tuhé upnutí je u 3D tiskárny vnímáno jako upnutí, které minimalizuje vliv na nepřesnosti dílce vzniklé od vnějších sil působících na tiskovou hlavu. Tyto síly pocházejí od několika původců. Jednak vlivem tisku dochází k normálové složce síly proti směru vytlačování, tak i při kladení vlákna a „smýkání trysky po povrchu“. Ze zmíněných dvou je zanedbatelná normálová složka, ale třecí síly vzniklé mezi vrcholem trysky a tištěným dílcem mohou být znatelné, vzhledem k možným nepřesnostem na povrchu tištěného dílce. Další síly, s nimiž je nutné uvažovat, jsou síly setrvačné, vzniklé z akcelerace tiskové hlavy. Tato akcelerace záporná, či kladná a působící ve směru, nebo proti směru osy x.

Výpočet namáhacích sil je odvislý od zrychlení a hmotnosti tělesa. Zrychlení krokového motoru je dáno rychlostí pulsů, jenž krokový motor řídí. Hledisko setrvačných sil je nutno kontrolovat v případě vzniklých tiskových nepřesností na výtisku, ve směru osy x.

Funkční upnutí musí zajišťovat, aby se vrchol trysky dostal v nejnižší poloze osy x na ose z pár milimetrů pod tisknutelnou plochu a bylo tak možné jeho seřízení

polohy koncovým dorazem. Velice důležitým parametrem je navržení uchycení tiskové hlavy a tiskové hlavy samotné tak, aby nebylo ubráno na tiskovém prostoru, který udává maximální možnou velikost tisku. Maximální možný tiskový objem je považován za kvalitativní vlastnost tiskárny a jeho zmenšením by klesla i technologická hodnota, což je nežádoucí. Stávající tiskový prostor udávaný prodejcem viz tiskárna Rebel II je 190 x 190 x 180 mm. Tento prostor je vhodné zachovat, popřípadě rozšířit. Na obrázku X je vidět osa x v nejnižší pozici, vrchol trysky je nutno umístit cca 2 mm pod hranici vyhřívané podložky. Vztažná úroveň je brána od spodní hrany ocelové tyče o průměru 8 mm (obr. 32).



Obr. 32 Minimální vzdálenost osy x od vyhřívané podložky.

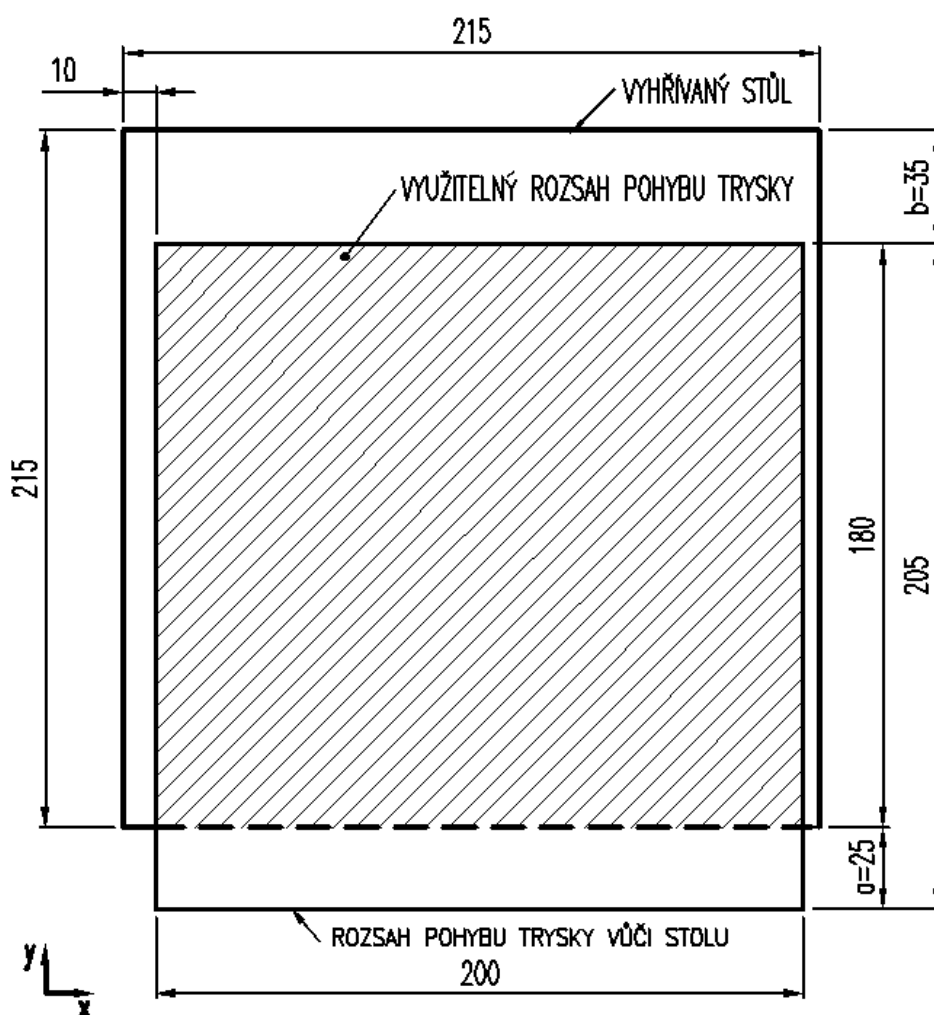
Posuvným měřítkem byla naměřena minimální vzdálenost 46 mm. To znamená, že výsledná výška, do které bude umístěn vrchol trysky, bude spočtena:

$$h_t = h_m - h_s + h_p = 46 - 3 = -48 \text{ mm} \quad (3)$$

kde:	výška stolu od trysky	h_t [mm],
	naměřená vzdálenost	h_m [mm],
	tloušťka zrcadlové podložky na stůl	h_s [mm],
	kalibrační dráha přejezdu trysky	h_p [mm].

Konstrukce tiskové hlavy musí být taková, aby vylepšila, dodržela, nebo se alespoň maximálně přiblížila stávajícím tiskovým rozměrům. U tiskové hlavy Rebel II, která je modifikována na variantu dvojité trysky, je nutno zohlednit rozměry, které by mohly omezit pohyb ve zbývajících osách. Po uvažení je zřejmé, že rozhodující je zejména osa pohybu tiskové hlavy a předsunutí trysky. To je možné demonstrovat na (obr 33), kde jsou zobrazeny maximální rozsahy pohybu. Jak je vidět, tak tryska přejíždí mimo stůl dle rozměru $a = 25 \text{ mm}$. Tento přejezd je možné částečně redukovat posunutím vertikálních nosníků a změnit tak celkově

dispozici. Přejezd má však svoji funkci, slouží k vertikálnímu nastavení dokovací polohy $z = 0$. Z důvodu ochrany tiskárny proti kolizi trysky a stolu. Tuto vzdálenost $a = 25 \text{ mm}$ lze tedy dodržet i v případě většího přesahu trysky, za současného posunutí vertikálních nosníků rámu ve směru osy y . Tisková plocha ve směru osy x je mírně vychýlena a je možné posunout konstrukci tiskové hlavy o $2,5 \text{ mm}$ vlevo, než je původní umístění. Pro dodržení maximálních tiskových rozměrů je vhodné tisk koncentrovat do jednoho bodu. Z tohoto vychází, že optimálnější tryska vůči zachování tisknutelných rozměrů je se 2 materiály na vstupu a jednou výstupní tryskou.



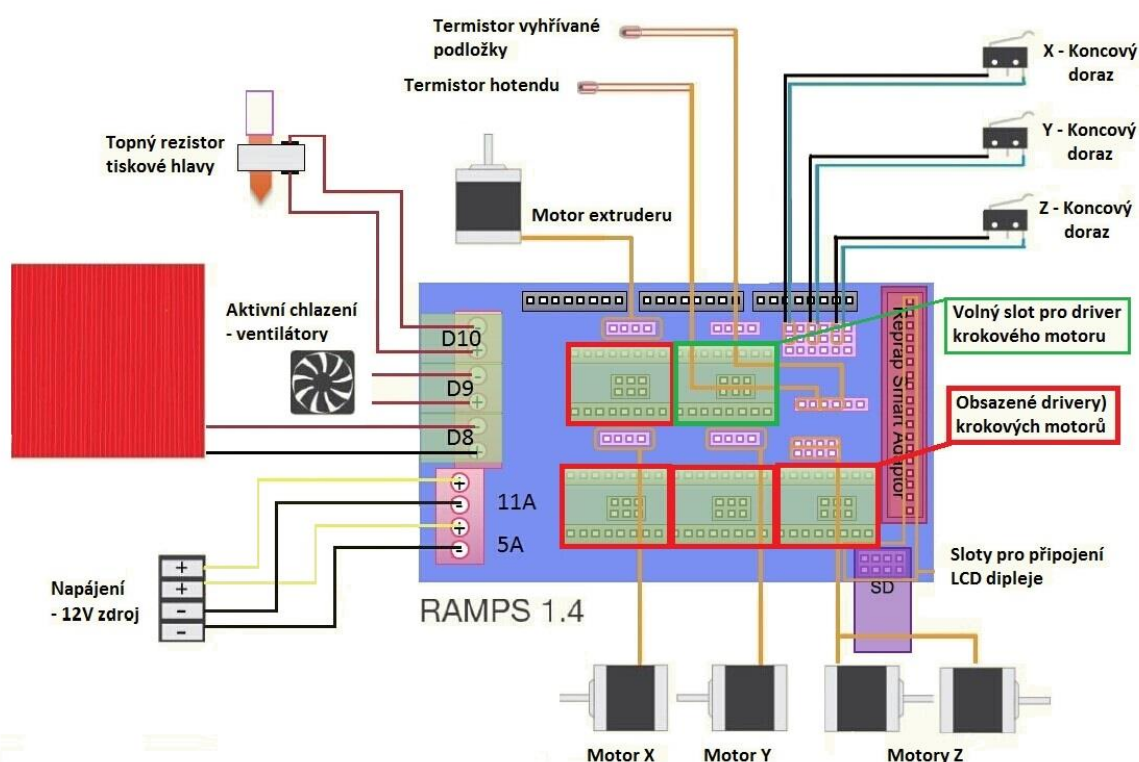
Obr. 33 Naměřené horizontální rozsahy tiskárny Rebel II.

• Elektrotechnická

Tisková hlava včetně všech náležitostí musí být schopná připojení do stávajícího elektronického řízení. Aby byla tiskárna schopna tisknout ze 2 materiálů, musí se tedy přidat 1 krokový motor, pro pohon tiskové struny. Nejméně zatěžující variantou hot endu je taktéž kombinovaný hot end se dvěma vstupy a jednou výstupní tryskou. Tento typ hot endu může být zahříván jedním topným rezistorem a měřen jedním termistorem. Toto dovoluje při modifikaci využít stávající

elektroniku. Ventilátor pro chlazení celokovového hot endu lze navrhnout tak, aby chladil obě části přívodu tiskové struny najednou, což umožňuje využít stávající ventilátor beze změny s přepojováním na Ramps 1.4. Koncové dorazy není třeba měnit, pouze musí být zkalibrovány po zkompletování duální tiskové hlavy.

Jediným přidaným elektrickým zařízením je krokový motor. Krokový motor je připojován do desky Ramps 1.4 a pro jeho samostatnou funkci je nutné, aby mu byl dodán driver krokového motoru. Dle schématu z (obr. 34) je jasné, že na desce Ramps je jedno volné místo pro přidání driveru. Označeno je zeleným obdélníkem. Vedle něho se nacházejí i sloty pro napájení krokového motoru [70].



Obr. 34 Schematické stávající zapojení spotřebičů do ramps 1.4 [70].

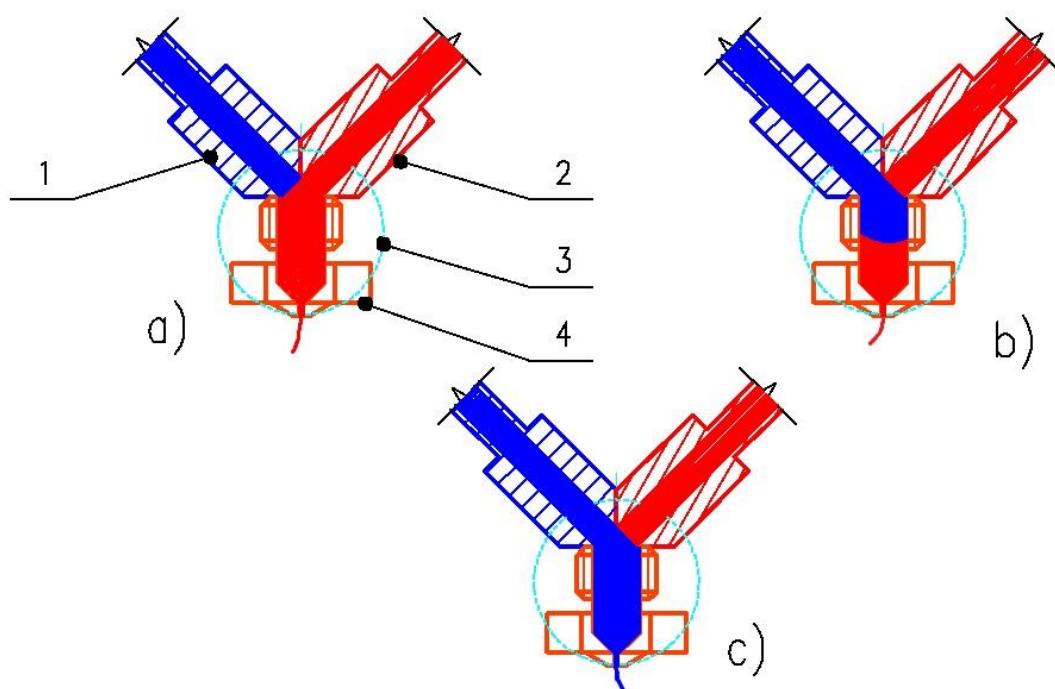
• Softwarová

Software Repetier - Hostu je schopen zohlednit vícero tiskových hlav a původní software je tedy dostatečný. Nutné je pouze nahrát nově osazené pozice do mikroprocesoru Arduina. K tomu slouží program Arduino IDE. Pro upravení tohoto software je možno využít více cest. Jednou je fyzicky přepsat příslušná data v programovacím jazyce Arduina IDE. Druhou cestou, uživatelsky přívětivější, je použít configuration.h ze zdrojového firmware a jeho upravení skrze tzv. web - konfigurátor od Repetier - Hosta na následující internetové stránce <https://www.repetier.com/firmware/v092/index.html> [71], [72].

3.2 Požadavek funkčnosti tiskové hlavy

Hlavním problémem u kombinovaných hot endů je neschopnost okamžité výměny materiálu. Rovněž je zapotřebí předchozí materiál vytlačit mimo výrobek materiálem požadovaným. K tomu se vedle výtisku staví otírací prvky, které toto zabezpečí. Pro dobré využití materiálu je vhodné, aby se tiskové struny tavily v co možná nejmenší tavné komoře, která však zabezpečí dostatečné natavení materiálu. Zároveň je třeba, aby se tisková struna tavila až co možná nejblíže vstupu, kde dochází k její tavbě. Toto je nutné, pro to aby se při změně materiálu netavil materiál původní a samovolně tak nevytékal a neředil materiál, z něhož tiskneme. To je možné vyrovnat pomocí povytažení tiskové struny, která právě netiskne.

Postup tisku navrhovaným principem viz (obr. 25). Na obrázku a) je znázorněn tisk červeným materiálem, modrá není vytlačována, popřípadě je zpětně povytažena krokovým motorem, tím se snižuje tlak modrého materiálu a vliv přimísení do červeného. Na obrázku b) dojde ke změně požadavku barvy a červená tisková struna je povytažena, aby snížila tlak na natavený červený materiál. Do modré začne tlačit krokový motor a vytlačuje červené zbytky v tavné komoře. To je možno sesynchronizováním s programem, nebo stavbou otěrové věže vedle výrobku. Na obrázku c) je znázorněn ukončený cyklus a tiskárna tiskne čistě modře.



Obr. 25 Výměna barvy v duálním hot endu. (1) Přívod modrého materiálu (2) Přívod červeného materiálu (3) Tavná oblast (4) Jednotná tryska.

3.3 Požadavek běžné výrobitelnosti

Vzhledem k tomu, že je duální tisková hlava navržena pro systém RepRap, tak je vhodné uvažovat výrobu na strojích dostupných běžné zámečnické dílny. Pro zjednodušení výroby je vhodné využít konstrukci, která dovolí větší tolerance nepřesnosti výroby. Příkladem minimálního vybavení, na kterém je součást možno realizovat, jsou následující:

- **Pásová pila - GÜDE MBS 125**

Pásová pila s variabilním nastavením rychlosti pásu. Vhodná pro řezání ocele, hliníku, mědi, korozivzdorné ocele, PVC a teflonu. Zvláště vhodná pro rychlé a přesné řezy. Robustní pevná konstrukce a kuličkové ložisko přesné otáčení pásu zajišťují přesné řezy. Úhel kyvné hlavy stroje umožňuje řezy od 0 ° do - 60 ° [73].

Vybavení [73]:

Potenciometr pro nastavení rychlosti pásu, přesné kuličkové ložisko vodící pásky, on / off vypínač, jistič, stupnice 0 ° - 60 °, pilový pás.

Parametry stroje [73]:

- napájení: 230 V ~ 50 Hz,
- výkon: 400 W (S6 30%),
- otáčky motoru: 2000 - 4200 min⁻¹,
- pilový pás rozměry: 1435 x 0,65 x 12,7 mm,
- max. řezný výkon: 90 °/127 x 125 mm, 45 °/80 x 100 mm,
- rozsah otočení: 0 - 60 °,
- řezná rychlost: 38-80 m.min⁻¹,
- pořizovací cena 7901 Kč s DPH.

- **Dvoukotoučová bruska OPTIgrind SM 200 (230 V)**

Bruska je trvanlivého, průmyslového provedení s bezúdržbovým motorem pro trvalé nasazení. Vyvážený rotor s kvalitními kuličkovými ložisky zajišťuje dlouhou trvanlivost při tichém chodu. Součástí je stabilní, přestavitelná opěrka obrobku a ochrana zraku, magnetický spínač s uzamykatelným nouzovým vypnutím. Dva široké univerzální korundové brusné kotouče. Vyrobeno ve shodě dle evropských CE norem [74].

Volitelné příslušenství [74].

- nástěnný držák, BOW3107050,
- podstavec, BOW3107100,
- brusné kotouče.

Parametry stroje [74]:

- výkon motoru [W]: 600,
- napájecí napětí [V] / [Hz]: 230 / 50,
- rozměr nástroje - průměr [mm]: 200 × 30,
- upínací rozměr nástroje - průměr [mm]: 32,
- zrnitost: K36P / K80N,

- otáčky motoru [$\text{U} \cdot \text{min}^{-1}$]: 2 850,
- hlavní rozměry stroje [mm]: 461 × 246 × 310,
- pořizovací cena 5312 Kč včetně DPH.

- **Stolní soustruh - Opti D 180 x 300 Vario**

Jedná se o kompaktní, víceúčelový soustruh s plynulou regulací otáček vřetene. Zobrazení otáček je realizováno pomocí digitálního ukazatele. Vhodný pro kusové obrábění menších obrobků [75].

Parametry stroje [75]:

- otáčky vřetene 150 – 1 250 $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$ a 300 – 2 500 $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$,
- kalené vřeteno uložené v přesných kuželíkových ložiscích,
- kalené čelo vřetene (DIN 6350),
- koník je možno vychýlit $\pm 2,5$ mm pro soustružení kuželů,
- velký rozsah řezání závitů pomocí sady výměnných kol,
- s vodícím šroubem pro řezání závitů nebo automatický posuv,
- prizmatické lože ze šedé litiny, indukčně kalené a přesně broušené,
- vymezení vůle u všech vedení pomocí klínových lišt,
- motor 600 W,
- přepínač chodu vpravo-vlevo s nulovou polohou,
- pořizovací cena 28 490 Kč včetně DPH.

- **Stolní frézka OPTImill BF 16 Vario**

Stolní frézka je určena pro přesné opracování menších dílů. Vhodná pro kusovou výrobu [76].

Parametry stroje [76]:

- frézovací hlava sklopná o 180° umožňující frézování a vrtání v každém úhlu,
- sloup stranově přestavitelný umožňuje delší pojezd i při sklopené hlavě,
- mnohostranné použití,
- s elektronicky nastavitelnými otáčkami vřetene 100 – 3 000 $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$,
- jednoduchá a přehledná obsluha,
- stupnice pro všechny osy jsou nastavitelné,
- upínání vřetene MK 2,
- vymežitelná vůle rybinových vedení ve všech 3 osách (pomocí klínových lišt),
- pořizovací cena 24 188 Kč včetně DPH.

3.4 Požadavek nízké hmotnosti konstrukce tiskové hlavy

Hmotnost tiskové hlavy je dána souborem všech komponent, které na ní jsou přítomny. Dle složení tiskové hlavy Rebel II je nejtěžším komponentem krokový motorek, který váží 0,3 kg. V případě duální tiskové hlavy je nutno přidat jeden krokový motor, čímž by se váha hlavy téměř zdvojnásobila. To by vedlo k nucenému snížení použitelné tiskové rychlosti. Z tohoto důvodu je vhodné uvažovat metodu bowden (v podrobnostech viz kapitola 1.2.5 Podávání

materiálu). Pro konstrukci všech komponent tiskové hlavy je pro volbu vhodné uvažovat i hmotnost materiálů jednotlivých dílců a volit ty s nižší hmotností.

3.5 Požadavek nenáročné montáže

Montáž musí být proveditelná v podmínkách běžné zámečnické dílny. Ideálně bez speciálních přípravků, pouze za použití běžně dostupného montážního nářadí a universálních přípravků, jakým je například svěrák. Za běžné prostředky se například nepovažuje uložení s velkým přesahem, kdy je montáž možná za rozdílných teplot a vysokým tlakem na součást dle tolerance jednotné díry H8/x8 do 24 mm [77].

3.6 Požadavek nízké pořizovací ceny

Nízká cena je dána použitím maximálního počtu ze stávajících komponent a využitím tiskárny k tisku stavebních prvků nové konstrukce. V případě tisku určitých komponent na tiskárně je nutno tak provést, před demontáží stávající tiskové hlavy. Cena je složena z hodnoty materiálu, práce i z výrobních podmínek, jakými jsou příkladu stroje. Vhodné je využít kupříkladu prefabrikovaných levných dílů oproti drahé specializované práci, vyžadující speciální nástroje.

4 KONSTRUKCE DUÁLNÍ 3D TISKOVÉ HLAVY

V této kapitole jsou zpracovány požadavky z návrhu 3D tiskové hlavy metody FDM.

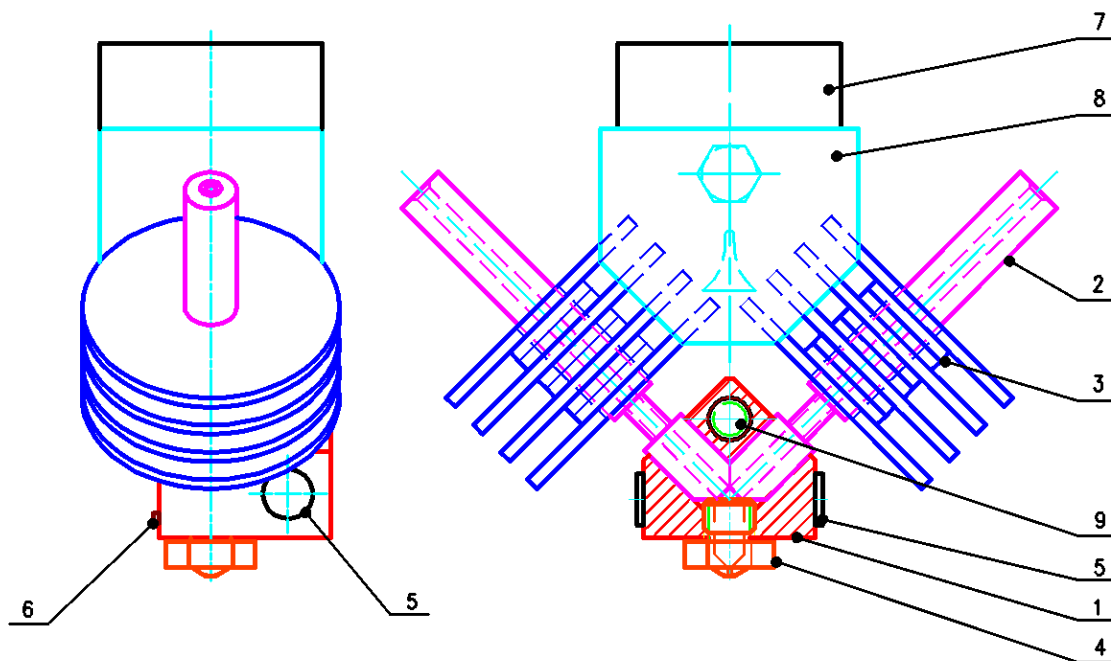
Duální 3D tisková hlava je navržena tak, aby byla schopna tisknout 2 materiály obdobných tavných vlastností. To je využitelné pro tisk dílců, které jsou zejména designového charakteru jako dvoubarevné výtisky, nebo tisk tvarově složitých dílců s chemicky odbouratelnými podporami. Tisk s podporami je u tiskárny Rebel II je nezbytný až od úhlu 60° od svislého směru. Při tisku však dochází k prohýbání převisů a při nedostatečném odvodu tepla i deformaci dílce. Podpory je tedy možno použít i pro menší úhly. Nicméně lze tisknout podpory i ze stejného materiálu, ale musí být po ukončení tisku mechanicky odstraněny lámáním, řezáním, broušením a tak dále.

Pro potřeby barevného tisku a tisku podpor jsou navrženy 2 tiskové hlavy - Varianta „A“ a varianta „B“ obě mají svoje specifika. Varianta „A“ je konstruována se zaměřením na přesnost tisku s minimalizací tavné komory, kde dochází k mísení materiálů. Nevýhoda této varianty spočívá v přesném usazení a spoji pomocí teplovodivého lepidla. Tato varianta je nerozebíratelná a velmi obtížně čistitelná. Varianta B jde druhou cestou, kde se upřednostňuje vyměnitelnost dílů pro vyzkoušení více variant. Oba výrobky jsou popsány a jednotlivých dílů je zdůvodnění způsobu provedení dané konstrukce. Kde není uvedeno jinak, tak se předpokládá, že provedení je shodné pro variantu „A“ i „B“.

4.1 Tisková hlava varianta „A“

Jako vhodná 3D tisková hlava k požadavkům je vyhodnocena tisková hlava s duálním kombinovaným hot endem, který je aktivně chlazen přes žebrovaný chladič. Žebrovaný chladič je usazen na hřídeli, která je opatřena zápicchem pro snížení plochy přenosu tepla. Žebrovaný chladič je aktivně chlazen ventilátorem, který rovnoměrně rozděljuje přísun chladicího média. Umístění termočlánku zaznamenávající teplotu je situováno co nejbližší referenčnímu místu, jako které je volena oblast co nejbližší k trysce. Zahřívací rezistor je volen tak, aby zahříval oba druhy materiálu rovnocenně. Krokové motory jsou navrženy pro externí přidělení na rám tiskárny. Vedení bowdenů s tiskovou strunou je tomu nutno přizpůsobit. Elektrická kabeláž je vedena v pouzdře a dimenzována na maximální rozsah pohybů tiskové hlavy. Návrh podoby samotné tiskové hlavy viz následující obrázek 38A.

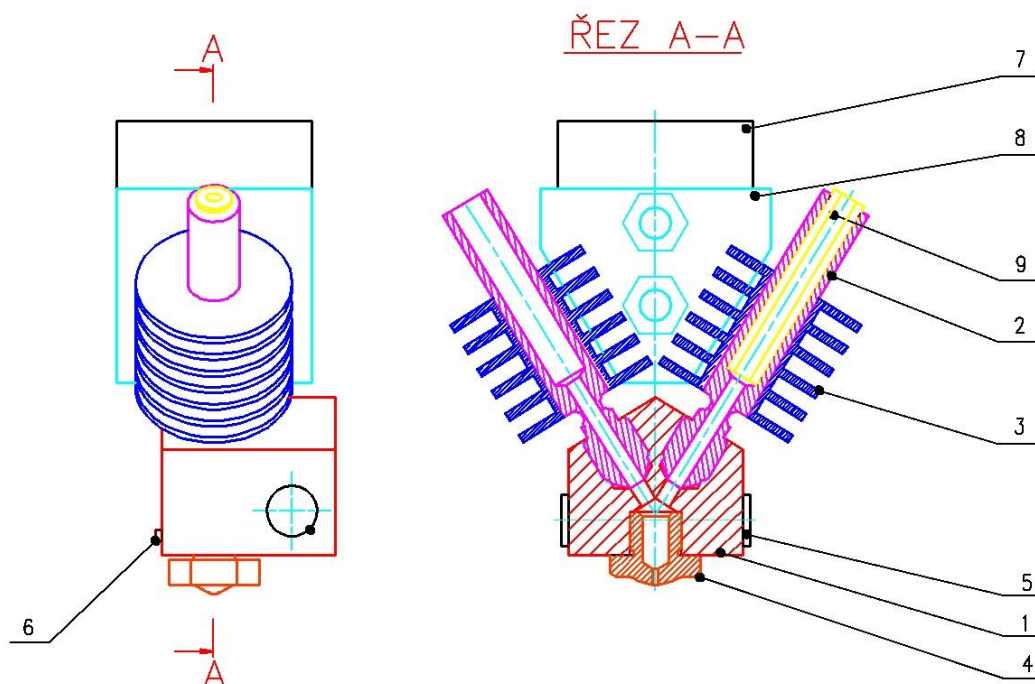
Provedení je navrženo jako nerozebíratelný lepený spoj, kde je zminimalizována tavná komora těsným dolehnutím jednotlivých zešikmených hřídelí. Díky tomuto spoji není možné výstupní část hřídelí opatřit závitem. Spoj je tedy lepen dvousložkovým lepidlem na bázi stříbra Arctic Silver™ Thermal Adhesive, které zároveň vyplní vzniklé mezery a utěsní tavnou komoru. Schematický náhled je na obr. 36.



Obr. 36 Návrh tiskové hlavy varianty „A“ (1) topné těleso, (2) přívodní hřídel, (3) chladicí žebrování, (4) tryska, (5) topný rezistor, (6) termistor, (7) ventilátor, (8) tvarový držák ventilátor, (9) kotvení k polohovacím částem.

4.2 Tisková hlava varianty „B“

Tisková hlava varianty „B“ je oproti variantě „A“ upravena do lehce demontovatelného typu. Umožní snadnější čištění a výměnu jednotlivých komponent. Na (obr. 37) je vidět heatblock, který má v sobě rozšíření dutiny. Toto rozšíření slouží pro uložení teflonové trubičky, která sníží přenos tepla a tím i předejde struny. Vzhledem, že je trubička vyrobena z teflonu. Na obrázku je tato trubička zobrazena pouze na pravé straně, ale ve skutečnosti jsou oba heatbrake stejné. Zobrazena je žlutě a popsána jako pozice (9).



Obr. 37 Návrh tiskové hlavy varianty „B“. (1) Ohřívací blok, (2) Heatbrake, (3) Chladící žebrování, (4) Tryska, (5) Topný rezistor, (6) Termistor, (7) ventilator, (8) Tvarový držák ventilator.

4.3 Konstrukce topného tělesa

Ohřívavý blok je navržen tak, aby byl co nejjednodušší a zároveň funkční a také byl vyroben z běžně dostupného polotovaru.

Materiál tepelného bloku musí mít zejména dobrou tepelnou vodivost, což je základní funkce tohoto tělesa. Další kritéria jsou obrobiteľnosť, korozivzdornosť, fyzikálna stálosť do minimálnej teploty 300 °C. To splňuje slitina hliníku.

Běžně dostupné čtyřhranné tyče 25 x 25 mm dodávané například společností ALMS spol. s r.o., jsou poskytovány ve 3 materiálových typech, a to [78]:

- **Slitina hliníku AlMgSi1**

- | | |
|------------------------|----------------------------------|
| - Tepelná vodivost | 170 - 246 W.(m.°C) ⁻¹ |
| - Měrná hmotnost | 2700 kg.m ⁻³ |
| - Odolnost vůči korozi | velice dobrá |
| - Obrobiteľnosť | dobrá |

- **Slitina hliníku AlMgSi0,5**

- Tepelná vodivost $200 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$
- Měrná hmotnost $2700 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- Odolnost vůči korozi velice dobrá
- Obrobitelost uspokojivá

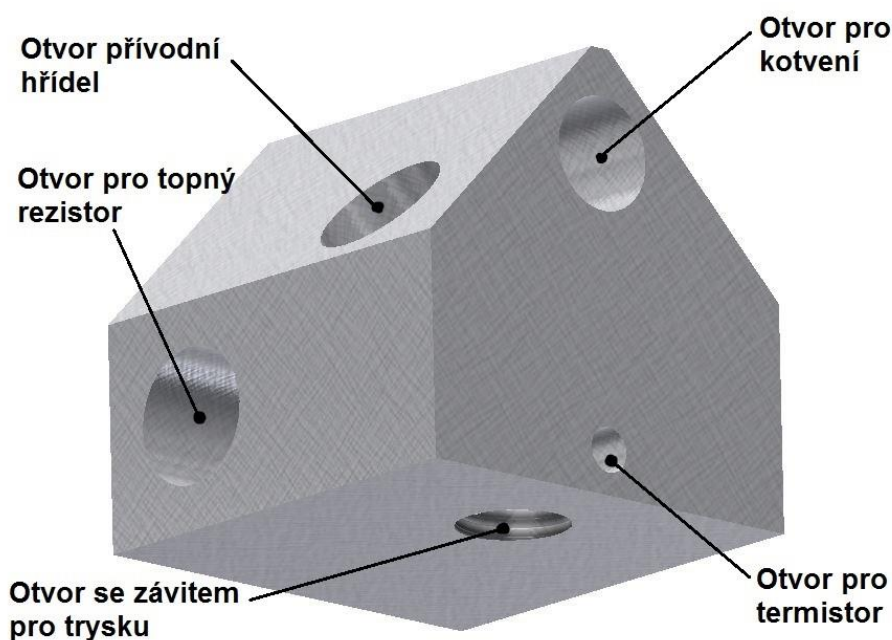
- **Slitina hliníku AlCuMgPb**

- Tepelná vodivost $130 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$
- Měrná hmotnost $2850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- Odolnost vůči korozi špatná
- Obrobitelost velice dobrá

Jako nejvhodnější materiál je zvolen AlMgSi0,5. Nejlépe ze zmíněných tří vyniká v ohledech, jakými jsou: vysoká tepelná vodivost, dobrá korozivzdornost, dobrá obrobitelost, nízká měrná hmotnost. [79]

4.3.1 Ohřívací blok varianta „A“

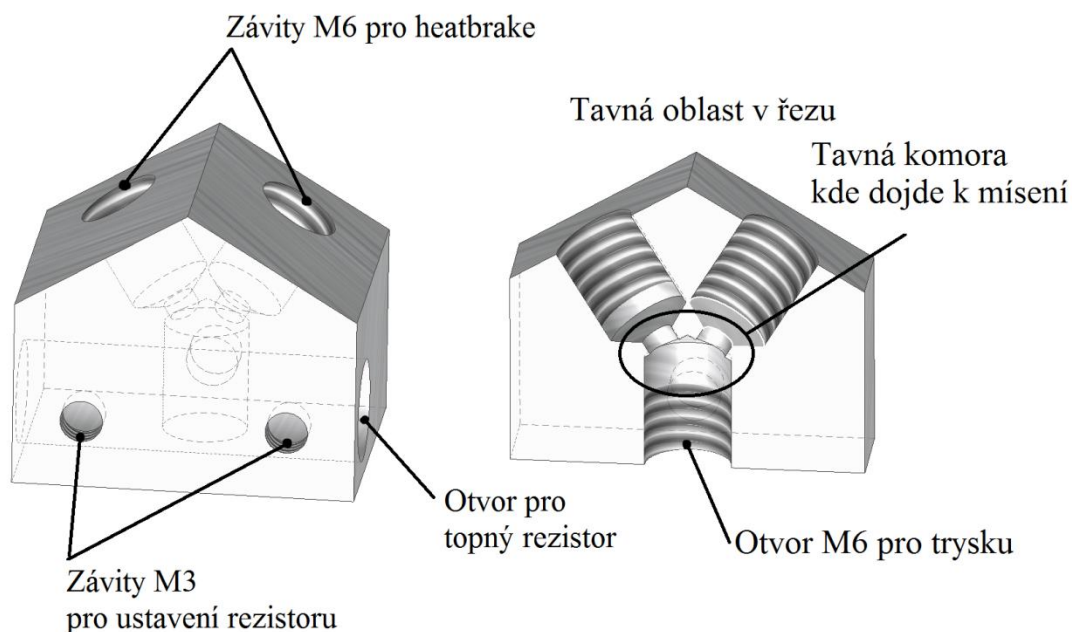
Jedná se o základní tvar, kde jsou 2x sraženy hrany po 45° pro snadné vrtání kolmých otvorů pro heatblocky. Do tohoto sražení jsou vrtány otvory pro heatblocky, které se osově potkávají spolu navzájem a zároveň protínají osu vrtání pro vyměnitelnou trysku. Tím bude docíleno, že se tekutý plast nebude dotýkat vyhřívaného tělesa, ale bude proudit z heatblocku rovnou do trysky. Na součásti je vyříznut závit pro uchycení demontovatelné trysky pro její čištění. Součást je zobrazena na (obr. 38).



Obr. 38 Ohřívací blok.

4.3.2 Topné těleso varianta „B“

Jedná se o podobný tvar, kde jsou 2x sražené hrany po 59°. Úhly jsou voleny pro kolmé vrtání otvorů pro 2x heatbrake. Zde je umístění těchto dílů navrženo s menším úhlem mezi sebou, aby neměli takové tendence tlačit materiál místo do trysky, do druhého heatbrake. Pro jejich rozebíratelné ustavení je volen závit M6, který odpovídá i u sériových výrobců, jakými jsou například prodejci z domény www.3Draty.cz. Otvor pro termistor není na obrázku níže patrný, leží na odvrácené straně v blízkosti trysky. Dle doporučení není vhodné vrtat průchozí otvor až k závitu trysky, ale ponechat tam slabou stěnu. To zejména z důvodu vytékání taveného materiálu. Jedná se tedy o částečné zahloubení, do kterého bude termistor zalepen teplovodivým lepidlem. Otvor pro topný rezistor je veden kolmo na osu trysky a je navržen tak, aby ohříval část rovnoměrně, i když tento vliv není podstatný z hlediska výborných vodivých vlastností voleného materiálu. Detail návrhu je k náhledu na následujícím (obr. 39), kde je také vidět řez skrze tavnou komoru. Tato komora bude ve styku s materiálem, konstrukčně má za funkci dosednutí heatbrake a pokračování jeho dutiny až k trysce. Výkresová dokumentace k ohřívacímu bloku je přiložena v příloze diplomové práce.



Obr. 39 Ohřívací blok „B“.

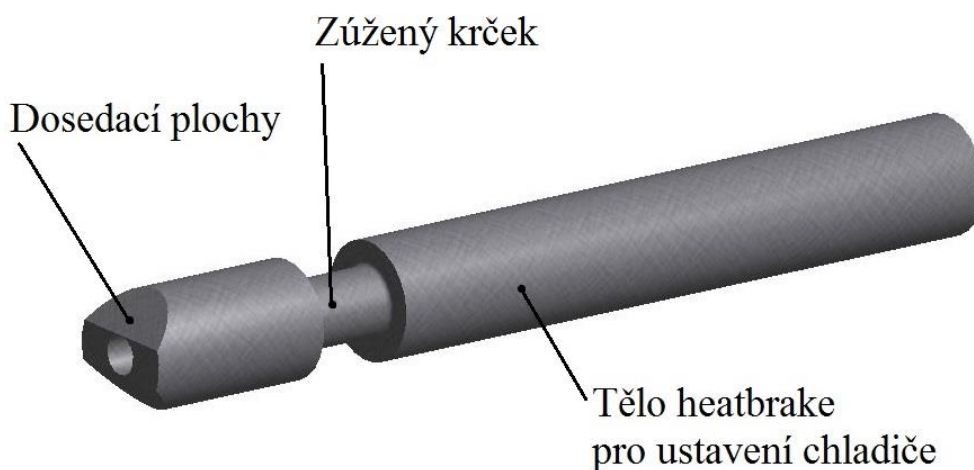
4.4 Konstrukce heatbrake

Heatbrake je třeba vyrobit z korozi-vzdorné oceli, která má nižší tepelnou vodivost. Nevýhodou je, že se takový to materiál většinou hůře obrábí, což může být při zapichování krčku problém. U tiskové struny průměru 1,75 je třeba volit vnitřní průměr mezi 1,85 - 2 mm. Při velkém průměru bude mít materiál tendenci téci zpět, při volbě malého průměru se teplotní roztažností plastu zasekne tisková struna v heatbrake a nepůjde s ním pohybovat.

4.4.1 Heatbrake varianta „A“

Na trhu je k dostání hydraulická trubka přesná bezešvá DIN 2391 E235 s vnějším průměrem 6 mm a vnitřním 2 mm. Ta je volena jako vstupní materiál.

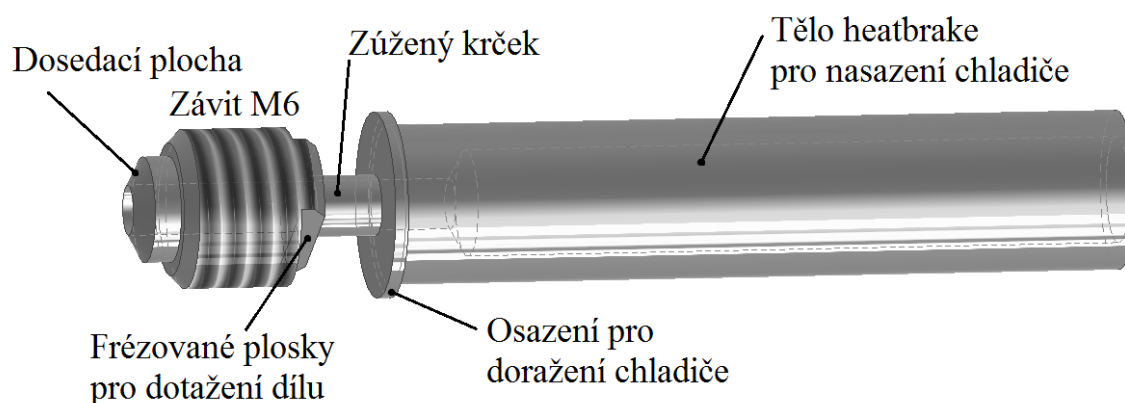
Zkosená část heatbrake ústí přímo do tavné komory, kde se bude opírat zkosením v úhlu 45° o druhý heatbrakel, který je opatřen též zkosením 45°. Tyto části mezi sebou tedy svírají úhel 90°. Druhá část zešíkmení uzavírá prostor mezi přívodní hřídelí a vstupem do trysky. Část tiskové struny bude tavena již v této hřídeli, ale je žádoucí, aby jen v lokálním měřítku. Toho je docíleno zápichem, kde je zúžen průřez materiálu, který eliminuje prostup tepla do delší části hřídele. Tam bude osazena hřídel dodatečným odvodem tepla. Tvar přívodní hřídele je zobrazen na (obr. 40).



Obr. 40 Heatbrake „A“.

4.4.2.1 Heatbrake varianta „B1“

U této navržené varianty je po zkušenosti s tiskovou hlavou „A“ uvažováno s opatřeními proti přilnutí taveniny ke stěně. Je volen menší průměr vnitřní dutiny a to 1,9 mm s tolerancí H8. Heatblock je také z části pod chladičem vybrán na světlost dutiny 4 mm. Toto rozšíření je navrženo pro teflonovou vložku, pro minimalizaci tření a přenosu tepla, které již v této části nedosahuje teploty, kdy by byl teflon v ohrožení teplem z rezistoru. Část o průměru 1,9 mm je v plné délce lapována za pomoci elektrické ruční brusky PROXXON 28440 MICROMOT 230/E s užitím brusné pasty vrtáčku shodného průměru a obráceného chodu. Tím je docílen lesklý vzhled vnitřní dutiny bez, okem rozeznatelné, drsnosti povrchu. Výkresová dokumentace je přiložena k diplomové práci. Navržený heatblock je na (obr. 41).



Obr. 41 Heatbrake „B1“.

4.4.2.2 Heatbrake varianta „B2“

Jedná se o sériově vyráběný hybridní heatbrake, který je schopen tisknout, až do teploty degradace teflonu. V případě, že dojde k degradaci teflonu, je jej možno vyměnit a heatbrake používat dál. Tento typ hybridního heatbrake zkracuje tavnou zónu a dle prodejce je třeba zvednout teplotu oproti celokovovým typům cca o 5 – 10 °C Tento hybridní heatbrake je dostupný ke koupi na adrese www.3draty.cz. Náhled je k dispozici na (obr. 42).



Obr. 42 Heatbrake „B2“ [80].

4.4.2.3 Heatbrake varianta „B3“

Jedná se o sériově vyráběný heatbrake, který je plně ověřen při tisku s jednonásobným hotendem. Jedná se o původní heatbrake dodávaný se stavebnicí Rebel II od JRC a.s. Tento heatbrake je dostupný na rebelove.obchod.org. Náhled je k dispozici na (obr. 43).



Obr. 43 Heatbrake „B3“.

4.5 Konstrukce chladícího žebrování

Chladící žebrování je část 3D tiskové hlavy, která má za úkol odvádět přebytečné teplo, které je vedeno přívodní hřídelí zpětně proti směru podávání materiálu. Tím zkracuje tepelně ovlivňující oblast materiálu. Tato část je vhodná vyrobit z tepelně vodivého materiálu, který dobře odvádí teplo. Pro zvýšení účinku chlazení bude tato část ofoukávána ventilátorem.

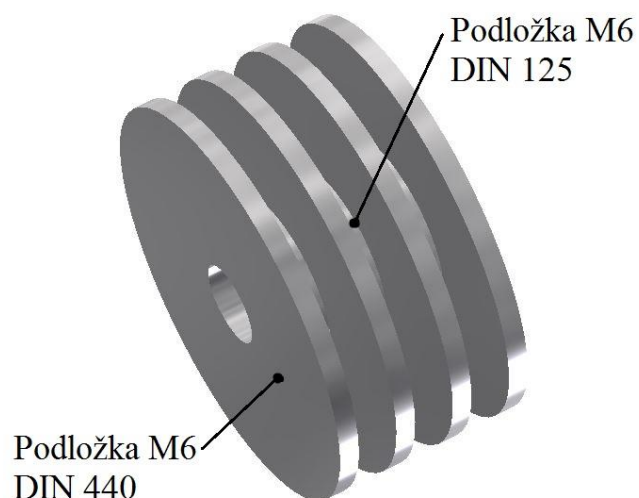
Vhodný materiál pro výrobu je opět slitina hliníku, nebo materiál s dobrými teplovodními vlastnostmi a nízkou hustotou, pro nižší celkovou hmotnost tiskové hlavy. Z konstrukčního hlediska je možno tento dílec soustružit a upichovacím nožem provést hluboké zápichy, nebo vrstvit na sebe.

4.5.1 Chladící žebrování varianta „A“

Jednodušší a méně náročná varianta na výrobu je však složit toto těleso z jednotlivých segmentů. Lze sestavit ze segmentů sesazených podložek. Segmenty lze libovolně řadit za sebe. Jeden segment se skládá z:

- 1x velká podložka pro dřevěné konstrukce M6 DIN 440
- 2x podložka M6 DIN 125A a

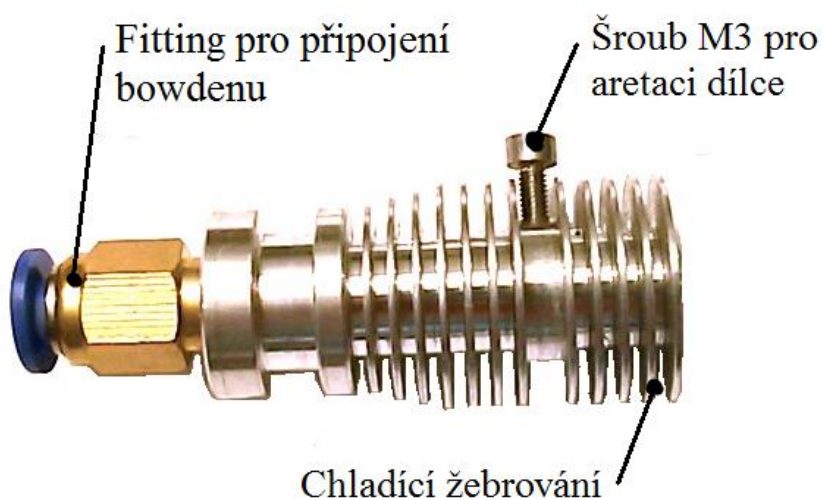
Na následujícím (obr. 44) možno vidět chladící žebrování složené ze 4 segmentů.



Obr. 44 Chladící žebrování „A“.

4.5.2 Chladící žebrování varianta „B“

Tento dílec lze lehce zakoupit v mnoha různých podobách. Tento konkrétní chladící prvek má však jako součást fitting pro připojení bowdenu a je tak vhodný pro tiskovou hlavu varianty B. Jeho vnitřní průměr je 6 mm a odpovídá všem navrženým heatbrake. Rozšířená zadní část je možná krátit. Původně sloužila pro ukotvení jednoduchého hotendu (obr. 45). Tato sestava je dostupná na adrese www.3draty.cz.



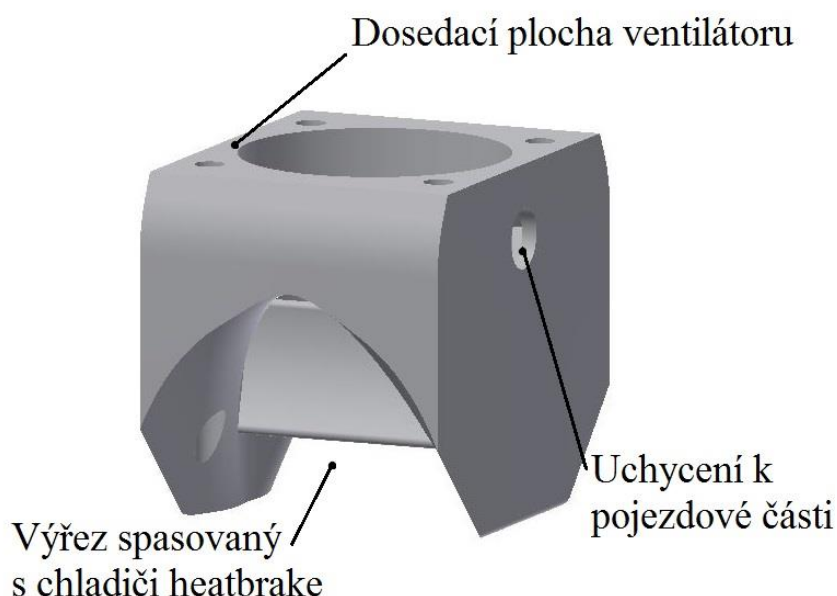
Obr. 45 Chladící žebrování „B“.

4.6 Konstrukce tvarového držáku ventilátoru

Držáky ventilátoru jsou navrženy tak, aby usměrňovali proud vzduchu s co možná nejmenším odporem, který snižuje účinnost ventilátoru a vydává nežádoucí hluk.

4.6.1 Tvarový držák ventilátoru varianta „A“

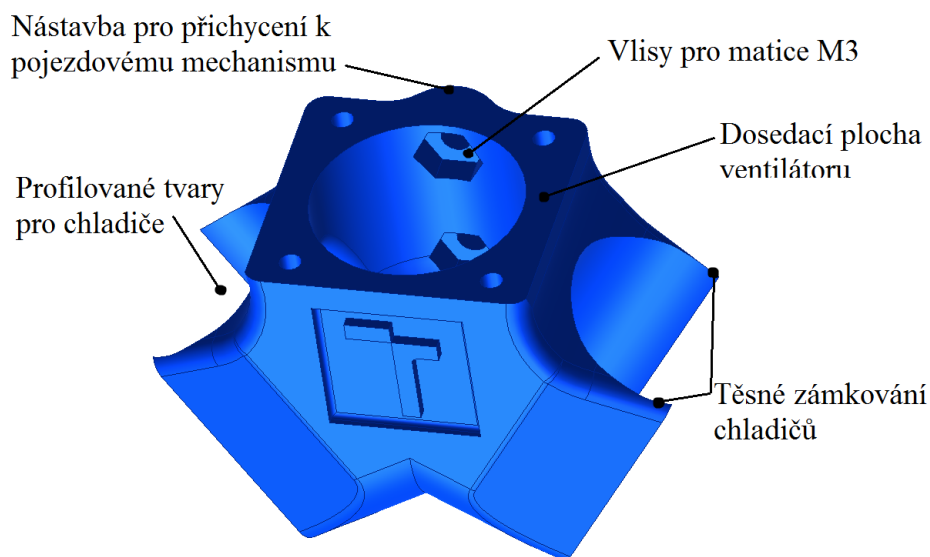
Tvarový držák ventilátoru slouží k uchycení ventilátoru a směřování přiváděného vzduchu na chladiče. Chladiče jsou dva a pootočený vůči sobě o 90°, proto je třeba vzduch z ventilátoru rozdělit na dva samostatné proudy chladící jednotlivé chladiče. To je provedeno profilovanou přepážkou, která je k tomu uzpůsobena. Předpoklad je takový, aby bylo co největší proudění přítomno u spodního žebra, které je nejbližší k zápichu na hřídeli. Dílec je navržen pro tisk na 3D tiskárně z transparentního ABS. Navržený držák je na (obr. 46).



Obr. 46 Tvarový držák ventilátoru „A“.

4.6.2 Tvarový držák ventilátoru varianta „B“

Tvarový držák ventilátoru slouží k uchycení ventilátoru a celého hotendu k pojezdovému mechanismu. Tento držák slouží k rovnoměrnému rozdělení mezi chladicího média mezi oba chladiče. Chladiče jsou vůči sobě pootočený o 62° a držák musí zajistit bezvadné samonosné upnutí. Dílec je navržený pro tisk na 3D tiskárně z tmavěmodrého ABS. Navržený držák je na (obr. 47).



Obr. 47 Tvarový držák ventilátoru „B“.

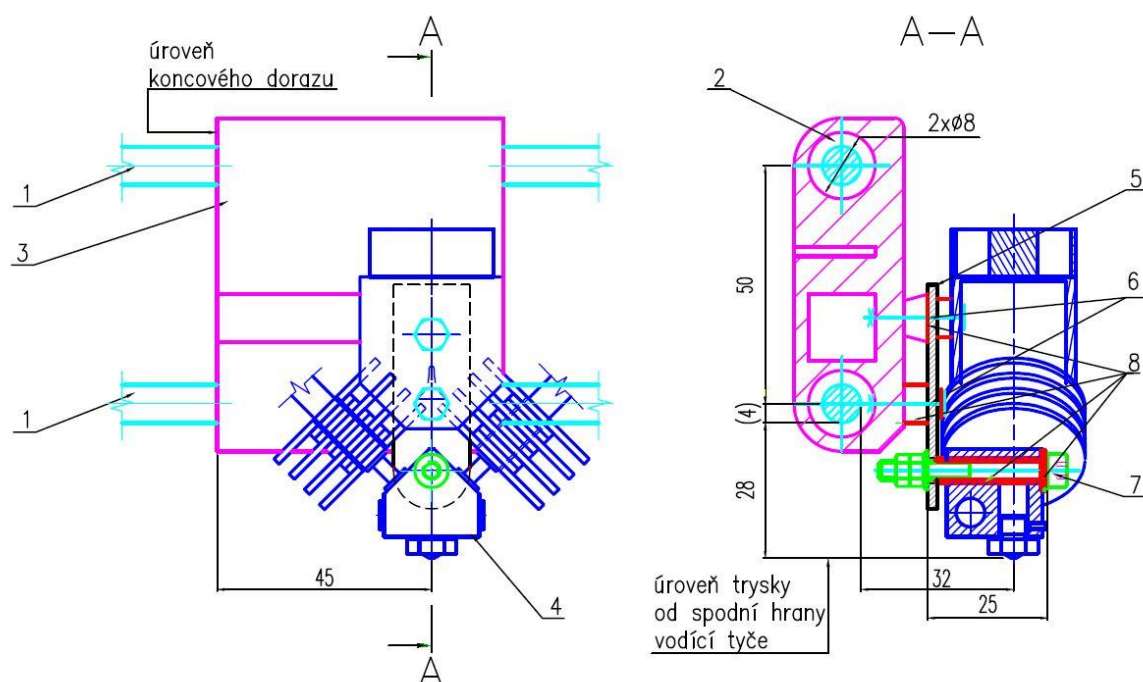
4.7 Kotvení tiskové hlavy k polohovacím částem

Jedná se funkční o upevnění mezi tiskovou hlavou a rámem tiskárny. Toto spojení musí být tuhé, lehké, spolehlivé. Musí zaručit nesníženou přesnost tisku v závislosti na setrvačných silách tiskové hlavy.

4.7.1 Kotvení tiskové hlavy k polohovacím částem varianta „A“

Upnutí tiskové hlavy je navrženo tak, aby se nezmenšila tisková plocha. Naopak menšími úpravami na tiskárně, je navrženo řešení, které horizontální rozměry zachová, ale přidá vertikálnímu směru možnost pohybu o 20 mm. K tomuto docílení bylo třeba změnit polohu a umístění koncového dorazu osy x a zohlednit to v návrhu 3D tiskové hlavy. Navrhovaným řešením je nyní možno tisknout 190 x 190 x 200 mm. Tímto řešením se zároveň přiblíží spodní poloha osy x ke krokovým motorkům. Závitové tyče mají určitou házivost, která se nejvíce projeví uprostřed a může mírně vychylovat i vodící tyče, které mají za úkol držet tisk v odpovídajících tolerancích. Z tohoto důvodu vychází předpoklad, že tisk v nižších polohách, s tímto provedením, je přesnější.

Základní umístění tiskové hlavy vůči vodícím tyčím je zobrazeno na (obr. 48). Na tomto obrázku jsou jednotlivé části zobrazeny jednotlivými barvami. Podstatnou barvou je zde červená, která naznačuje, kde je instalována tepelná izolace. Podstatou této izolace je, aby tepelná energie z topného tělesa neunikala skrze tepelně dobře vodivé díly, jakým je spojovací materiál. Jedná se především o šroub pozice 7, který vede skrze ohříváný blok a má přímý vliv na odvod tepla. V mezikruží mezi tímto šroubem a ohříváním blokem je tedy teflonová izolace, která tyto tepelné ztráty snižuje. Teflonová izolace je využita i na dalších zobrazených částech.



Obr. 48 Kotvení 3D tiskové hlavy k polohovacím částem. (1) Vodící tyče (2) Lineární ložiska LM8UU (3) Universální pojezd x na GT řemen (4) Tisková hlava (5) Kotvící plech (6) Kotevní šrouby (7) Kotevní šroub tepelně odizolovaný (8) Izolace.

- **Vodící tyče**

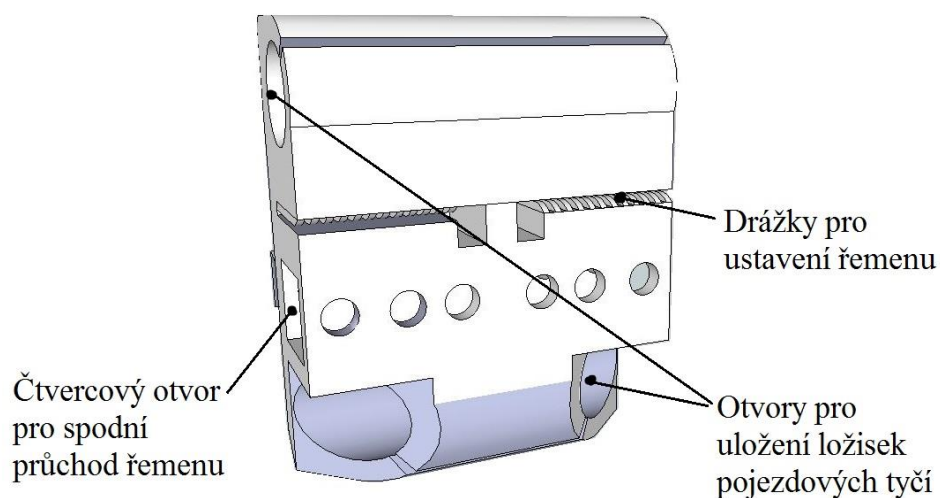
Vodící tyče na (obr. 48) jsou vymezením pohybu ve směru osy x. Jsou od sebe vzdáleny 50 mm a tomu se podřizuje veškeré uložení. Od spodní hrany tyče měřena vzdálenost k vyústění trysky. Od čelní strany měřena horizontální vzdálenost k ose trysky.

- **Lineární ložiska LM8UU**

Ložiska jsou součástí stavebnice Rebel II, je nutno je demontovat z původního pojezdu a montovat do stávajícího.

- **Pojezd osy X pro variantu „A“**

Tento pojezd viz (obr. 49) je základním tělem celé tiskové hlavy varianty „A“. Do tohoto tělesa jsou zapasována ložiska a je na něm kotvena celá tisková hlava. Toto těleso je poháněno ozubeným řemenem, který je zajištěn v drážkách. Tento pojezd je universální a je dostupný na internetové adrese www.rebelove.org. Toto těleso je navrženo ve smyslu reprop a jedná se tedy o součást plně vytisknutelnou na 3D tiskárně. Tento díl je tištěn z transparentního ABS materiálu.



Obr. 49 Universální pojezd x na GT řemen [81].

- **Tisková hlava**

Tisková hlava je popsána blíže v kapitole 1.2.1

- **Kotvicí plech**

Tento plech je redukcí mezi pojezdem a tiskovou hlavou. Mezi oběma tělesy je teflonová izolace, aby nedocházelo k přenosu tepla z topného tělesa na zbytek tiskárny.

- **Kotevní šrouby**

Dle (obr. 48) se jedná o šrouby, které kotví tvarový držák ventilátoru ke kotvicímu plechu a ten k universálnímu pojezdu. Tyto šrouby jsou tepelně izolovány, aby se snížilo množství přeneseného tepla do ostatních částí. K izolaci je použita teflonová trubička a teflonová těsnící páska.

- **Kotevní šroub tepelně odizolovaný**

Tento šroub je obzvláště důležitý, protože kotví ohřívaný blok hot endu. U tohoto šroubu dojde k největšímu zahřátí i přes tepelnou izolaci.

- **Kotevní šroub tepelně odizolovaný**

Tento šroub je nejvíce vystaven teplotnímu vlivu. Proto je nutné nejlépe izolovat proti přestupu tepla z topného tělesa do něj a poté i z něj do kotvicího plechu. Tento šroub bude i přesto zahřát na vysokou teplotu a výrazný vliv na něj bude mít tepelná roztažnost. Z tohoto důvodu je vhodné tento šroub dotáhnout za provozní teploty.

- **Izolace**

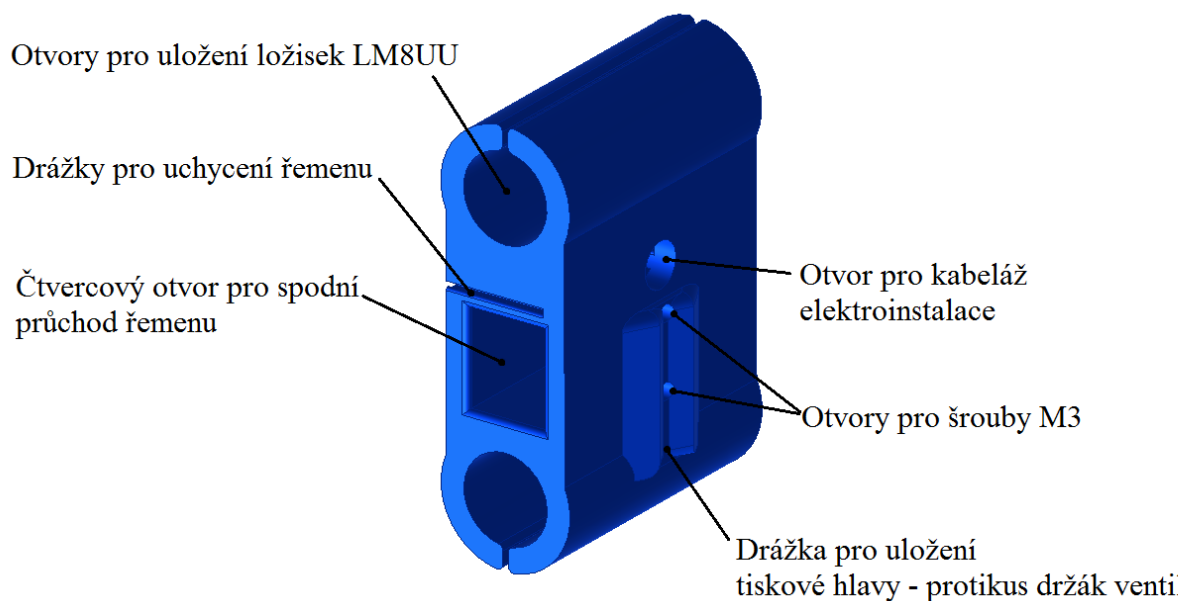
Jedná se o tepelnou izolaci a v případě pásky i těsnění. Tyto prvky jsou vyrobeny ze 100 % PTFE a mají tedy garantované vlastnosti, které má tento materiál. Z jeho vlastností vyplývá, že do 270 °C je použitelný beze změny vlastností. Teplota tavení ABS, na který je duální tisková hlava stavěna je cca 250 °C. To znamená 20 °C rezerva.[82]

PTFE odolává vysokým tlakům, má vysokou tepelnou stabilitu a jeho vlastnosti jsou s časem stálé. Zajišťuje dokonalou těsnost statických přírub z kovů, skla, plastů a keramiky. Díky své měkkosti a pružnosti zaručuje dokonalou těsnost na nerovných nebo poškozených částech přírub. Je odolné vůči všem chemickým produktům s výjimkou pro alkalických látek. Po dosažení teploty + 270 °C netaje, ale vytvoří rosolovitou vláknitou hmotu a tuto vlastnost si zachová až do teploty +327 °C [82].

4.7.2 Kotvení tiskové hlavy k polohovacím částem varianty „B“

Upnutí tiskové hlavy varianty B je navrženo tak, aby se nezmenšila tisková plocha. Naopak menšími úpravami na tiskárně, je navrženo řešení, které umožní tisk většího objemu ještě, než-li tomu je u varianty A. Navrhovaným řešením je nyní možno tisknout 200 x 190 x 200 mm. Tímto řešením se také přiblíží spodní poloha osy x ke krokovým motorkům. Závitové tyče mají určitou házivost, která se nejvíce projeví uprostřed.

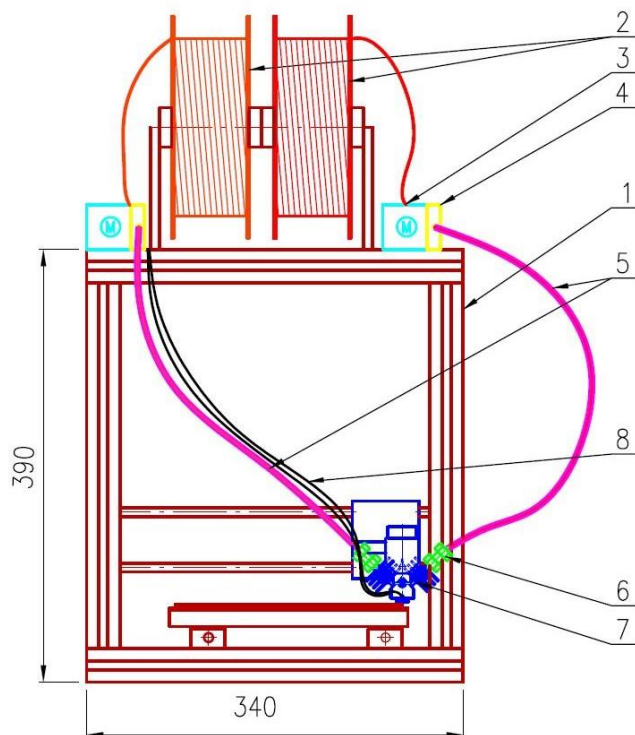
Základní umístění tiskové hlavy vůči vodícím tyčím je obdobné jako na předchozím obrázku, pouze zde není užít kotvící plech a tepelně odizolované části. Upnutí hotendu je realizováno za chladiče tiskové hlavy. Tyto chladiče jsou zapasovány do těsného tvarového držáku ventilátoru, který je dále kotven na pojezdový mechanismus opatřený ložisky. Tento mechanismus je nazvaný pojezd osy x a je k vidění na obr. 50.



Obr. 50 Pojezd osy X varianty „B“.

4.8 Konstrukce bowdenového mechanismu

Bowdenový mechanismus má za úkol dopravit tiskovou strunu na místo, kde dojde k natavení materiálu. Je nutné, aby struna v bowdenu nebyla příliš volná a neubíralo se tak na přesnosti podávané délky, popřípadě, aby se nemohla zpříčít. K tomu dostačuje teflonová hadička, která má vnitřní průměr 2 mm. Konstrukce se skládá ze 2 samostatných bowdenových vedení a pohonů, které se spojí, až v tavné komoře hot endu. Schematický náčrt lze vidět na (obr. 51).



Obr. 51 Schéma bowdenového provedení (1) Rám tiskárny Rebel II (2) Cívky s tiskovou strunou (3) Krokové motory (4) Pohon tiskové struny (5) bowdeny tiskové struny (6) Závitová spojka (7) 3D tisková hlava (8) Elektrické vodiče.

4.8.1 Rám 3D tiskárny Rebel II

Rám je tvořen stavebnicovou konstrukcí z hliníkové slitiny. Má ze 4 stran drážku do které je možné upnout šroub s tvarovou maticí, tím je na něj možno upnout a libovolně polohovat různé komponenty.

4.8.2 Cívky s tiskovou strunou

Cívka s tiskovou strunou je navržena pro upnutí na rám tiskárny Rebel II. Upnutí je realizováno pomocí stávající konstrukce, na hřídeli. Upnutí je realizováno šroubovým spojem v drážce rámu, takže je možno libovolně polohovat. Hřídel je nutno vyměnit za delší, aby pojala obě cívky. Hřídel je průměru 6 mm a je vyrobena z konstrukční oceli.

4.8.3 Krokové motory

Krokové motory jsou navrženy upnout na rám konstrukce, pro zachování maximální kompaktnosti tiskárny. Jsou upnuty ve tvarovém držáku, který je kotven do rámu. Čímž je opět zaručeno pevné upnutí a jeho polohovatelnost.

4.8.4 Pohon tiskové struny

Pohon tiskové struny je název, který zde značí převod kroutícího momentu krokového motoru na pohyb ozubeného kola a skrze toto kolo na tiskovou strunu, která je kladkou tlačena proti ozubení kola motoru. Regulovatelnost přtlaku je realizována pomocí polohovatelné pružiny.

4.8.4 Posunutí koncového dozaru osy z

Tento koncový doraz je nutno upravit a nastavit do polohy, díky které se nastaví nulová rovina nejnižšího bodu trysky.

4.8.5 Bowdeny tiskové struny

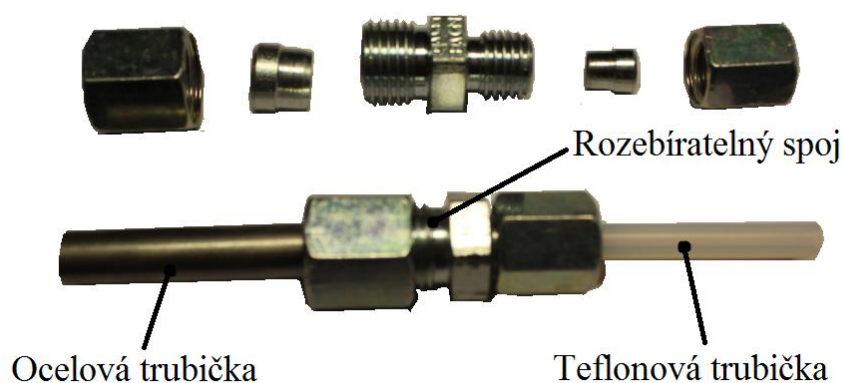
Základním bowdenové konstrukce je teflonová trubička, která zabezpečí nízké tření a dlouhou životnost. V případě vysoké teploty cold endu i vysokou tepelnou odolnost. Bowden musí být tak dlouhý, aby neomezoval 3D tiskovou hlavu v pohybu a zároveň nevytvářel ostré rádiusy, jenž by mohly způsobovat zvýšené tření. Bowdeny zároveň nesmí být zbytečně dlouhé, aby nedocházelo ke zvýšení tření v delším průřezu. Zároveň by mohly překážet při tisku. Délku těchto bowdenů je vhodné upravit až při montáži.

4.8.6 Závitová spojka

Jedná se o hydraulické komponenty, které vytvoří rozebíratelný spoj mezi ocelovou trubkou vnějšího průměru 6 mm a teflonovou hadicí průměru 4 mm. Oba tyto komponenty mají vnitřní průměr 2 mm a spojka nikterak nebrání zúžením průřezu. Tisková struna může tyde skrze tento spoj být tlačena bez zvýšeného odporu.

Tato spojka je realizována dle obr. 52. Z leva se jedná o komponenty [83]:

- M10 převlečná matice DIN 3870
- zářezný profilový prsten TN88 na trubku průměru 6
- spojka přímá redukováná (M10x1 - M8x1) RAS
- zářezný profilový prsten TN88 na trubku průměru 4
- M8 převlečná matice DIN 3870



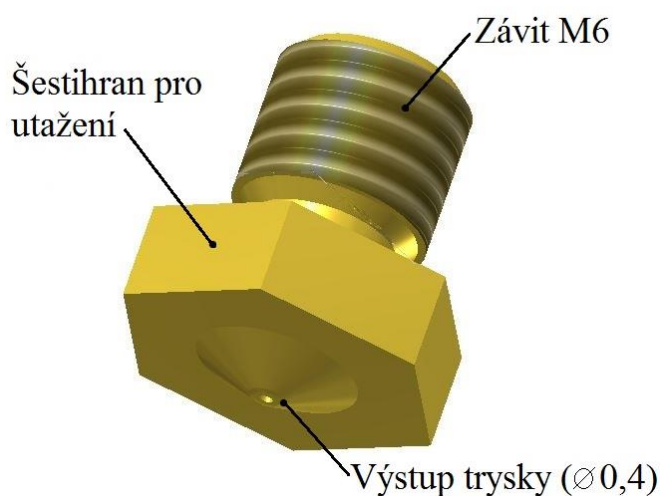
Obr. 52 Závitová spojka.

4.8.8 Elektrické vodiče

Jedná se o vodiče, které napájí topný rezistor a měřící termistor z hot endu. Tyto elektrické vodiče vedou do desky Ramps 1.4. Musejí vést cestou, kde se nebudou zamotávat, popřípadě překážet při tisku. Proto jsou vedeny podél bowdenu v chrániče. Jejich délka musí být dostatečná, aby neomezovaly tiskovou hlavu v pohybu, ale nesmí být příliš dlouhá, aby nepřekážely.

4.9 Konstrukce trysky

Tryska je poslední díl tiskárny, která přichází do styku s tištěným dílcem. Udává výstupní průměr vlákna, které postupně vrství tištěný výrobek. Dle dostupných trysek je volen doporučený průřez 0,4 mm. Tato volba je provedena z důvodů jednoduššího a rychlého tisku, než-li tomu je u trysek menšího průřezu, jaké jsou například 0,3 mm a 0,2 mm. Zároveň je dostatečně přesná pro tvorbu stavebních dílů 3D tiskárny, na které je tisk zaměřen. Materiál je volen mosaz, pro svoji dobrou tepelnou vodivost a dobrou obrobitelnost, která je předpokladem úspěšného vrtání malého výstupního průměru trysky. Návrh trysky je možný vidět na (obr. 53). Obdobná tryska je lehce dostupná se závitem M6 například na webu www.3Draty.cz či www.rebelove.obchod.cz tryšky za zmíněných obchodů se od sebe mírně liší.



Obr. 53 Tryska 3D tiskárny.

4.10 Topný rezistor

Topný rezistor je součástí hot endu a také dle jeho délkového rozměru je navržen ohřívavý blok. Délka topné části rezistoru činí 20 mm. Jeho průměr je 6 mm. Na (obr. 54) je vidět kovový obal rezistoru a červeně přírodní kabeláž.

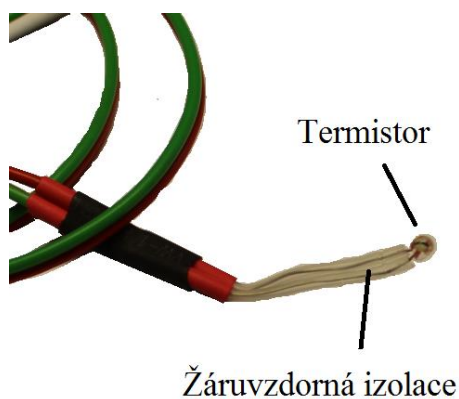
Tento rezistor je možné použít z původní tiskové hlavy a je společný variantám jak „A“, tak „B“.



Obr. 54 Topný rezistor.

4.11 Termistor

Termistor je součástí hot endu. Jedná se o jemnou elektroniku s velkým rozsahem měřených teplot. Udávaná nepřesnost tolerance je do 6°C, ale na rebelove.org se lze dočíst i větších nepřesností. Pro zabezpečení správné funkce termistoru je třeba jej umístit přímo do kontaktu s heatblockem. Jedná se o součást zalitou ve skleněném pouzdře a je tedy náchylná k popraskání pod tlakovým zatížením. Je velmi malých rozměrů, jeho funkční část je nepravidelného tvaru. Jeho tvar se nejvíce podobá elipsoidu. Rozměry termistoru jsou cca do 3 mm. Termistor je zobrazen na (Obr. 55). Je součástí varianty „A“ i „B“.



Obr. 55 Termistor.

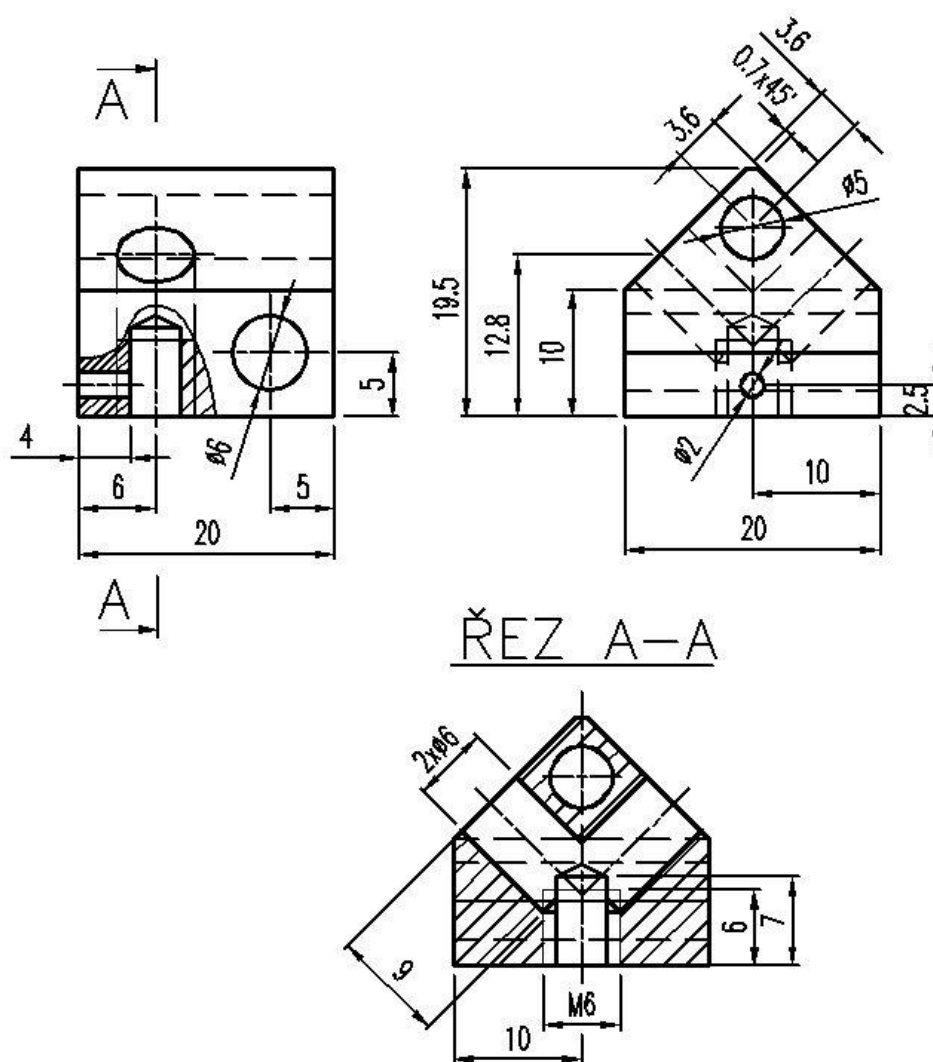
5 VÝROBA A KOMPLETACE 3D TISKOVÝCH HLAV

Jak je již výše zmíněno, tak výroba má být co nejjednodušší a proveditelná na běžném zámečnickém pracovišti. Na takovémto pracovišti postačuje základní výbava, která je uvedena v kapitole 3.3. U těchto základních strojů není zařazen strojní posuv, a proto je výpočet posuvu spíše orientačního charakteru. Jedná se o ilustrativní výpočty u varianty „A“, varianta „B“ je obdobná a není zde rozvedena. Při zhotovení varianty „B“ je brán zřetel na předchozí zkoušky varianty „A“. Vyhodnocení varianta „A“ viz kapitola 6.1.

5.1 Výroba ohřívacího bloku

Materiálem na výrobu topného tělesa je slitina hliníku $AlMgSi0,5$ dodávaná v tyčových polotovarech čtvercového průřezu o rozměrech 25x25 mm

Tento dílec se bude obrábět dle výkresu topného tělesa, zde je zobrazen na (obr. 56). Dělen z tyčového polotovaru bude na pásové pile GÜDE MBS 125. Obrábění včetně vrtání proběhne na frézce OPTImill BF 16 Vario.



Obr. 56 Ohřívací blok varianty „A“.

Pro frézovací operace bude použita jedna třízubá fréza typu W dle DIN 228 A o průměru 16 mm s upínací stopkou morse MK2. Doporučená řezná rychlost pro slitinu hliníku do 500 MPa je 150 m.min^{-1} . Posuv na zub je doporučen 0,1 mm.

- Pro výpočet otáček je nutno dopočíst dle vzorce [84], [85]:

$$V_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} [\text{m.min}^{-1}] \Rightarrow n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} [\text{min}^{-1}] \quad (4)$$

$$n = \frac{150 \cdot 1000}{\pi \cdot 16} = 2984.155 \Rightarrow \text{volím } 3000 \text{ min}^{-1}$$

- Pro výpočet posuvové rychlosti v_f je nutno využít vzorce [84]:

$$v_f = z \cdot f_z \cdot n [\text{mm.min}^{-1}] \quad (5)$$

$$v_f = 3 \cdot 0,1 \cdot 3000 = 900 \text{ mm.min}^{-1}$$

kde: z – počet zubů [-]

f_z – posuv na zub [mm]

n – otáčky nástroje [min^{-1}]

v_f – rychlost posuvu [mm.min^{-1}]

Pro vrtací operace bude využita stejná frézka. Jako vrtací nástroj budou použity vrtáky z tabulky nástrojů (tab. 5.1) [86], [87].

Tab. 5.1 Nástroje pro obráběcí operace topného tělíska.

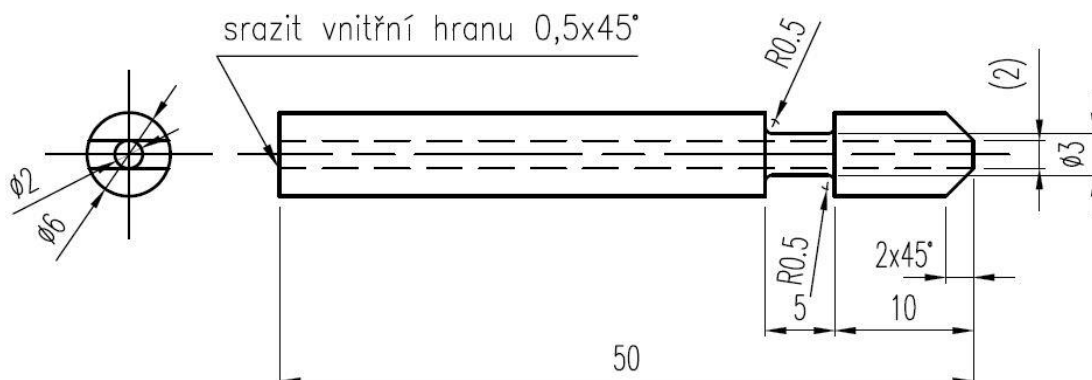
Nástroj	Norma	Řezná rychlost v_c [m.min^{-1}]	Posuvová rychlost v_f [mm.min^{-1}]	Otáčky nástroje [min^{-1}]
Čelní fréza Ø 16 mm	DIN 228 A	150	900	3000
Vrták Ø 2 mm	DIN1897	60 optimální	180	3000 (maximum)
Vrták Ø 5 mm	DIN1897	60 optimální	390	3000 (maximum)
Vrták Ø 4,8 mm	DIN1897	60 optimální	390	3000 (maximum)
Vrták Ø 6 mm	DIN1897	60 optimální	480	3000 (maximum)

5.2 Výroba přívodní hřídele

Jako polotovár je volena hydraulická trubka přesná bezešvá DIN 2391 E235 s vnějším průměrem 6 mm a vnitřním 2 mm. U této součásti se bude dělit, zapichovat, brousit a srážet vnitřní hrana dle (obr. 57).

- Dělen z tyčového polotovaru bude na pásové pile GÜDE MBS 125

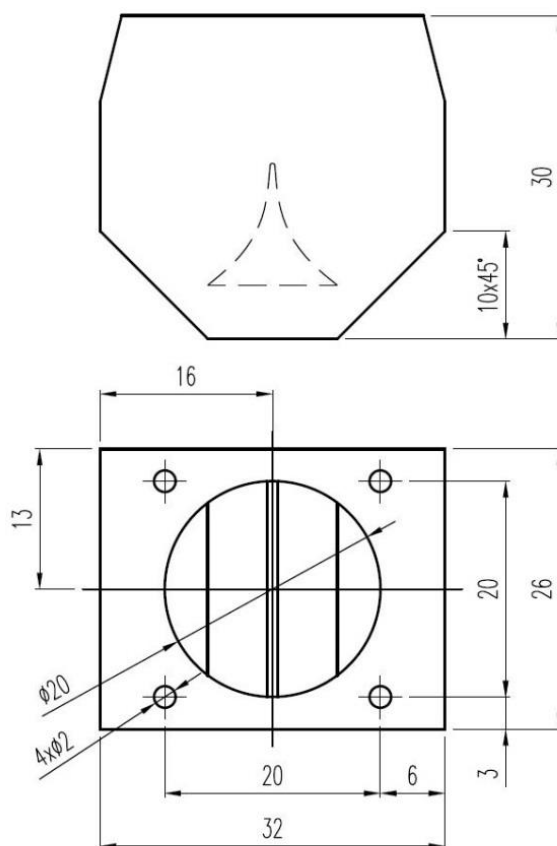
- Soustružnická operace bude prováděna na stolním soustruhu - Opti D 180 x 300 Vario. Jako nástroj k této operaci je volen soustružnický nůž upichovací 10x10x90mm P30 CSN 223730 10X10 X 90 , P30 / S30 dle DIN4981
- Sražení je realizováno na frézce



Obr. 57 Výkres přívodní hřídele.

5.3 Výroba tvarového držáku ventilátoru

Tvarový držák (obr. 58) ventilátoru je vyroben technologií rapid prototyping. Nejprve jsou získány potřebné a změřitelné hodnoty, které jsou na obrázku 58. Poté je provedena modelace v 3D programu Autodesk Inventor. Odtud se klasický model s příponou .step konvertuje do formátu s příponou „.stl“. Tento soubor je poté nahrán na opravu chybných geometrií na internetovou adresu <https://modelrepair.azurewebsites.net/>. V této fázi je soubor nahrán do programu Repetier-Host, kde pomocí podprogramu Slic3r se zpracuje model na jednotlivé vrstvy a trajektorie pohybu tiskárny. Ještě je třeba nastavit správné parametry tisku, jakými jsou například: teplota vyhřívaného stolu, teplota hot endu, množství podávané tiskové struny na posuv, výška jednotlivé vrstvy a další. Z trasování a nastavení je následně generován G – kód, který je odeslán do procesoru tiskárny. Následně je zahájen tisk prototypu. Pro správnou geometrii dílce je třeba vytisknout první díl porovnat nedostatky a upravit geometrii. Zde se ukazuje jako velká výhoda výroby touto technologií, kde je úprava dosažena během několika minut a je opět zadána počítačem řízená výroba. Doba tisku finální součásti 33 minut a 9 sekund. Pro zhotovení je položeno 115 vrstev a spotřebováno 2808 mm tiskové struny. Pro představu tisková struna stojí cca 5Kč/metr. Celková cena se pohybuje kolem 20,-Kč.

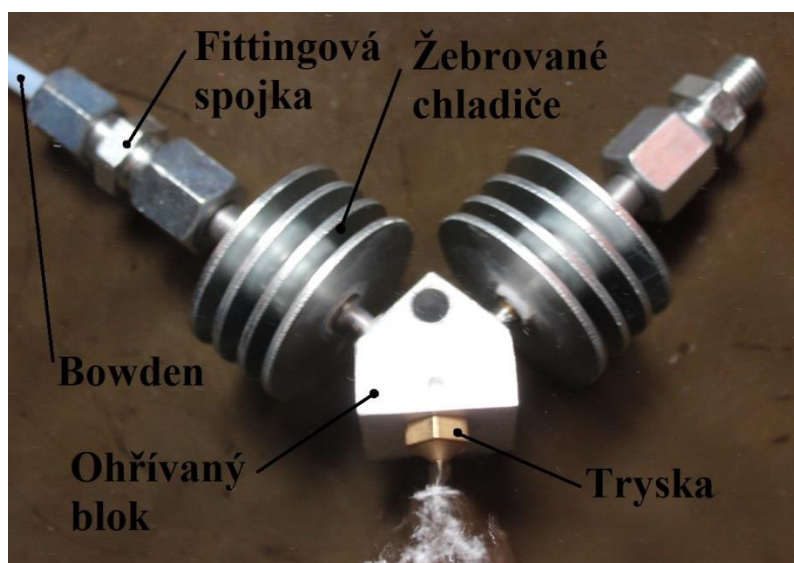


Obr. 58 Výkres držáku ventilátoru varianty „A“.

5.3 Kompletace tiskové hlavy varianty „A“

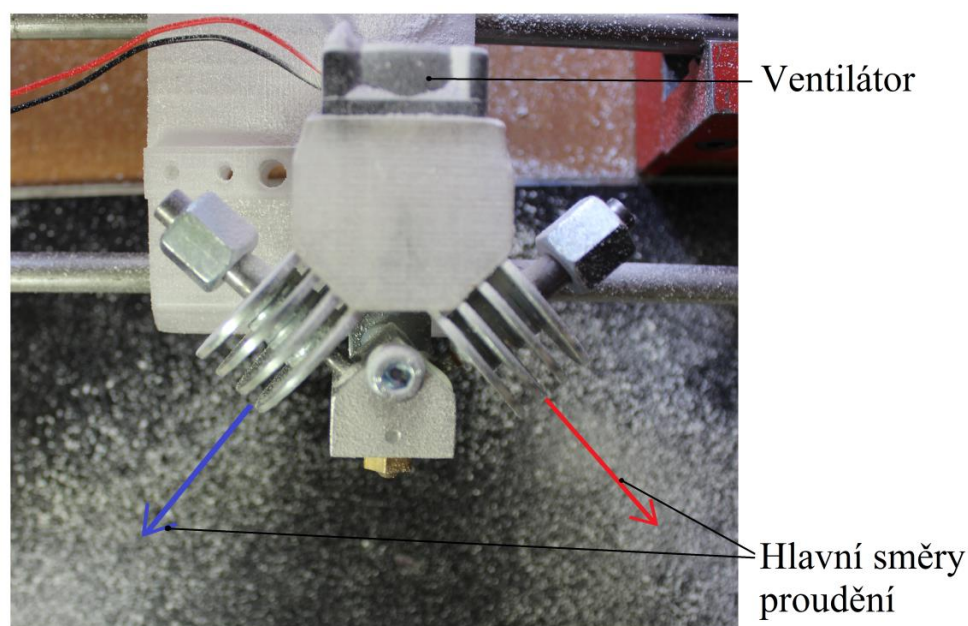
Nejprve je vše sestaveno bez lepidla a ověřeny dosedací plochy, poté jsou orýsovány heatbrake pro správnou hloubku a směr uložení. Nyní je přistoupeno k lepení. Pro lepení je užito dvousložkové teplovodivé lepidlo na bázi stříbra Arctic Silver™ Thermal Adhesive. Opatrně je lepidlo nanášeno tak, aby bylo po celém obvodu dosedacích ploch a nebylo nanášeno tam, kde přijde do styku s taveninou. Následuje zalepení chladiče z vrstvených podložek, taktéž tímto lepidlem. Nyní jsou osazeny konce fittingy následně je přilepen termistor do připraveného otvoru. Nyní je vsunut a zajištěn topný rezistor. Následně je celá sestava zahřata a je zašroubována tryska výstupního průměru 0,4 mm. Je vyzkoušen držák ventilátoru, který nesedí dle představ a je třeba jej přemodelovat a upravit, jak je zakreslen na obrázku výše. Mezitím jsou proveneny doplňující zkoušky a poté je tisková hlava upnuta na pojezdový mechanismus.

Z důvodu lepených spojů není možné zanedbat jejich netěsnost a je tedy pro kontrolu proveden test těsnosti pomocí stlačeného vzduchu. Jedna fáze tohoto testu je zobrazena na (obr. 59). Z tlakových testů o jmenovitém tlaku 8 bar vychází, že lepení proběhlo úspěšně. Následně je prostrčena tisková struna, prozatím bez trysky, a je ověřena poruchovost. Zároveň jsou očištěny zbytky lepidla.



Obr. 59 Test těsnosti vzduchem pod vodou tiskové hlava „A“.

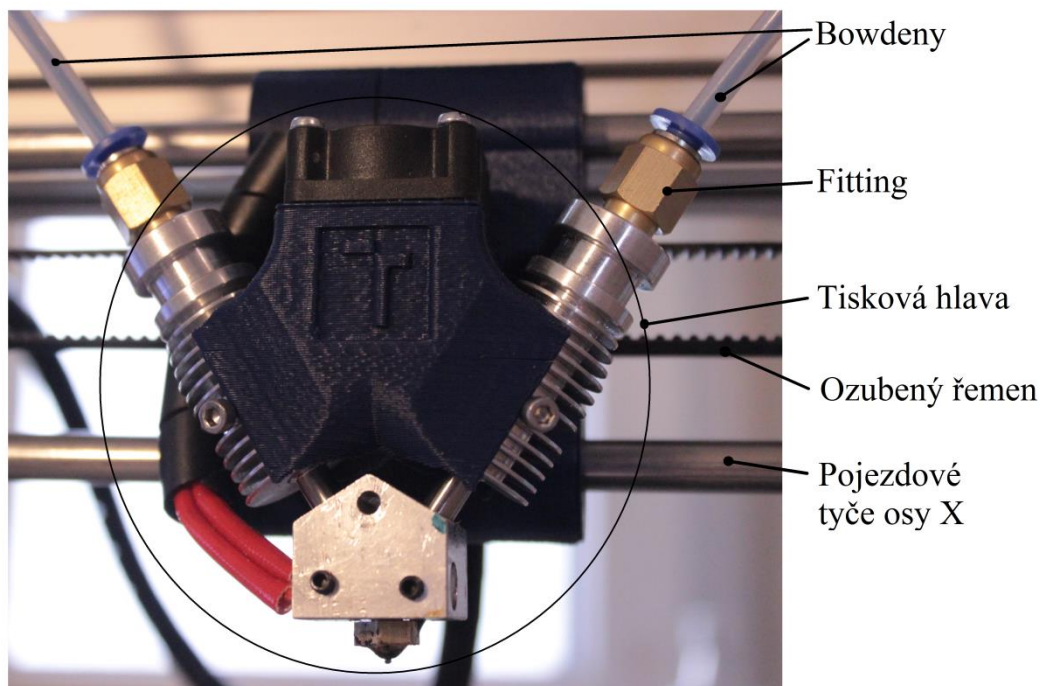
Po tomto testu je usazen držák ventilátoru, který již těsně doléhá na chladicí žebrování. Následně je tisková hlava upnuta k pojezdu osy x a osazena ventilátorem. Je proveden ilustrační test proudění vzduchu pomocí zapnutého ventilátoru a drcené křídly. Vzduch proudí očekávanými směry, viz (obr 60). Naposled se osadí tisková hlava topným rezistorem a termistorem a je připravena k prvnímu testu vytlačování vlákn.



Obr. 60 Test hlavního proudění chladícího vzduchu „A“.

5.5 Kompletace tiskové hlavy varianty „B“

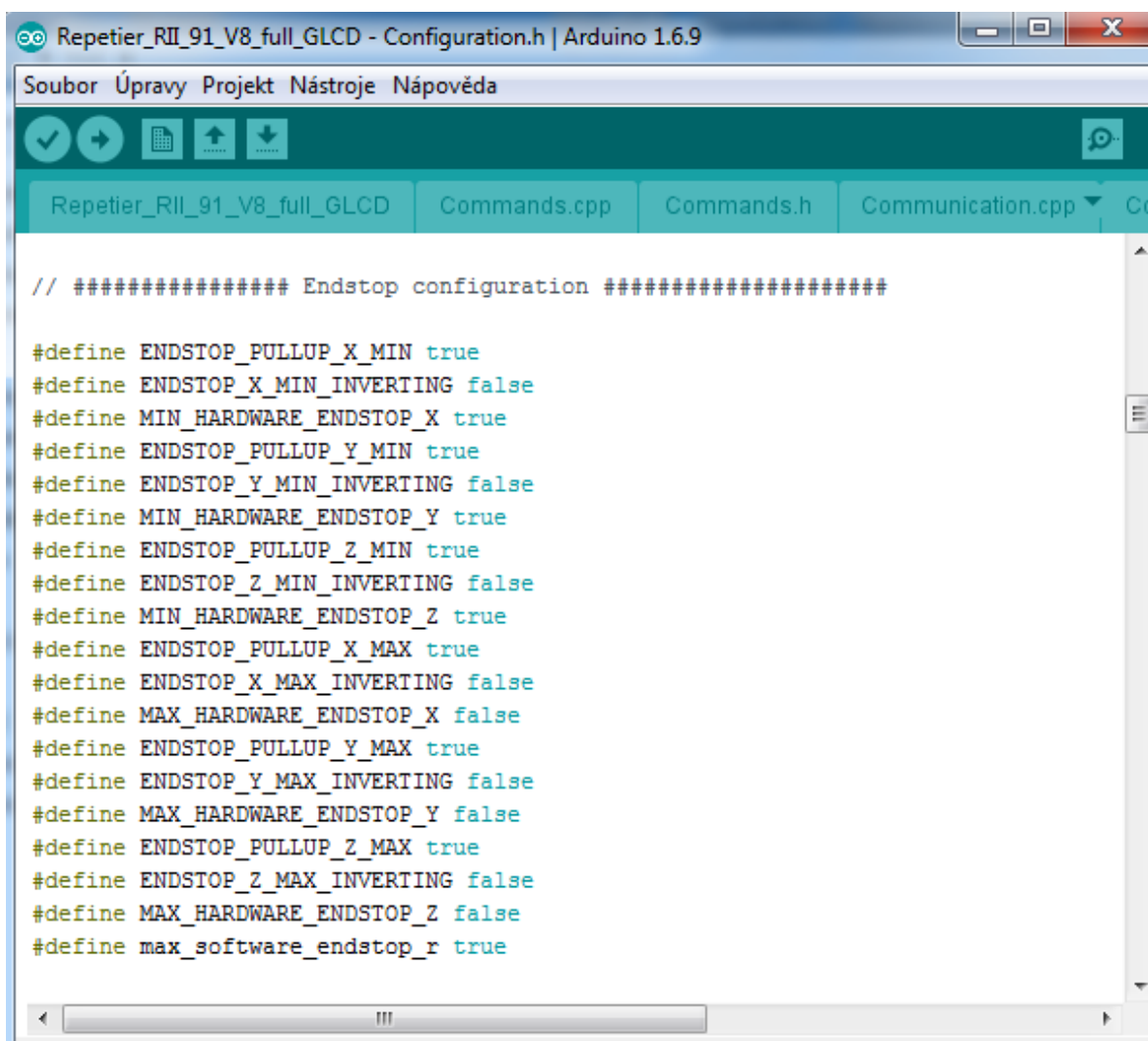
Tisková hlava „B“ je složena taktéž z částí zmíněných v předchozí kapitole. U této varianty jsou všechny dílce rozebíratelné, tryska a heatbreaky jsou opatřeny závitem M6 a jsou možné dotáhnout klíčem. U heatbrake vlastní výroby „B1“ je proveditelné dotáhnout závit díky vyfrézovaným drážkám, ještě před zeslabeným krčkem. Tryska a heatbrake jsou dotaženy za teploty 150°, aby došlo k těsnějšímu dosednutí. Ohřívaný blok je zahřát pomocí rezistoru a měřen termistorem zapojenými do tiskárny. Poté je na heatbrake nasazen chladič a zajištěn šroubem. Následně je na tuto sestavu usazen tvarový držák ventilátoru, který je pevně nasazen a samosvorností držáku ventilátoru, upevněn. Nyní je osazena tisková hlava elektronikou, což znamená ventilátor, topný rezistor a termistor. Tato celá sestava je následně upevněna pomocí 2 šroubů M3 a tvarové drážky na pojezd osy x, který je instalován na pojezdových tyčích. Je třeba upravit pozici koncového dorazu osy z a je možno přistoupit k testování. Tisková hlava osazená na tiskárně je znázorněna na (obr. 61).



Obr. 61 Tisková hlava varianty „B“.

5.6 Softwarové nastavení tiskárny

Je třeba přenastavit původní softwarové nastavení stavebnice Rebel II dodávané JRC a.s. Tiskárna je původně dodána s programy Repetier - Host, Arduino IDE a soubory s řídícím firmwarem pro řídící čip tiskárny. Tato stavebnice má nastavení upravené pro jednotlivé komponenty obsažené v stavebnici. Pro přidání motoru je tedy nutné upravit původní firmware. To je provedeno tak, že se zkopíruje zdrojový soubor „configuration.h“, který je obsažen ve firmware, do internetové stránky: <https://www.repetier.com/firmware/v092/>. Zde nahrajeme zmíněný soubor configuration.h. Toto nám nahraje dosavadní nastavení tiskárny do webového rozhraní a můžeme s ním zde pracovat. Zde přidáme další extruder a nastavíme společné topné těleso pro oba extrudery. Občas se změní chod tiskárny a je třeba opravit posuvy ve směrech os. Po nastavení všech potřebných změn stáhneme upravený soubor configuration.h a přes software Arduino IDE nahrajeme do tiskárny. Pokud toto nelze nahrát, tak je třeba vyzkoušet starší i novější verze software Arduino, které již nahraje nový firmware do tiskárny. Náhled z nastavení pojezdů v prostředí Arduino je na následujícím (obr 62).



Obr. 62 Náhled do prostředí Arduino.

6 TECHNOLOGICKÉ TESTY

Před zkušebním tiskem je třeba mít vyzkoušené teploty tavení obou tiskových strun, jejich teplota by měla být ideálně shodná. V případě, že se liší, tak je třeba, aby se jejich minimální a maximální teploty vhodné pro tisk protínaly a měli shodnou množinu použitelných teplot. Teplota se nedá určit PRO TISKÁRNU RepRap s vysokou přesností, každá tisková hlava měří v určité toleranci a je proto nutné odzkoušet teplotu tavení na stávající hlavě. Pro použitelnost zveřejněných teplot je třeba užít certifikovaná měřidla teploty, která nejsou pro uživatele nezbytná. Může si minimální teploty zjistit sám.

Teplota tavení se zjistí tak, že se postupně zvyšuje teplota hotendu a zároveň je prováděn posuv struny směrem do tavné komory. Jakmile se struna začne tavit a být vytlačována z trysky, tak je zaznamenána minimální tavnou teplota. Maximální vhodná tavná teplota není tak jednoznačná. Tisk by měl probíhat za teplot, kdy nedochází ke vzniku bublin v tiskovém vlákně, nekouří se, ani tisk nedoprovází zvýšený zápach či praskání.

Podstatné je, aby při tomto testu byly obě struny zasunuty až nadoraz, jinak by hrozilo, že materiál jedné vteče do kanálku druhé. Průměr přírodního otvoru je 1,9 mm a průměry nejčastěji používaných trysek se pohybují o průměrech 0,2 až 1.2. Z tohoto důvodu by tavenina vystavená vnějšímu tlaku volila větší otvor s menším odporem vůči tečení.

6.1 Technologické testy varianty „A“

Pro testování varianty „A“ jsou zvoleny materiály. Materiál 1 ABS transparentní dodané od společnosti JRC a.s., bez udaného výrobce a druhý materiál je volen ABS Cobalt blue, který pochází od společnosti Fillamentum. Dle parametrů níže je patrné, že za teplot 220 – 230°C se nalézá vhodný interval pro tisk oběma materiály. Dle ručního testu na tiskárně Rebel II je ovšem tisk vhodný u obou strun již kolem 210 °C. Jejich parametry jsou následující:

Struna č. 1

Materiál	ABS-T, transparentní
Hmotnost struny	1 kg
Průměr trysky	0,4 mm
Průměr struny	1,73 ± 0,05 mm
Teplota tisku	200 - 230°C
Barva struny	průhledná

Struna č 2

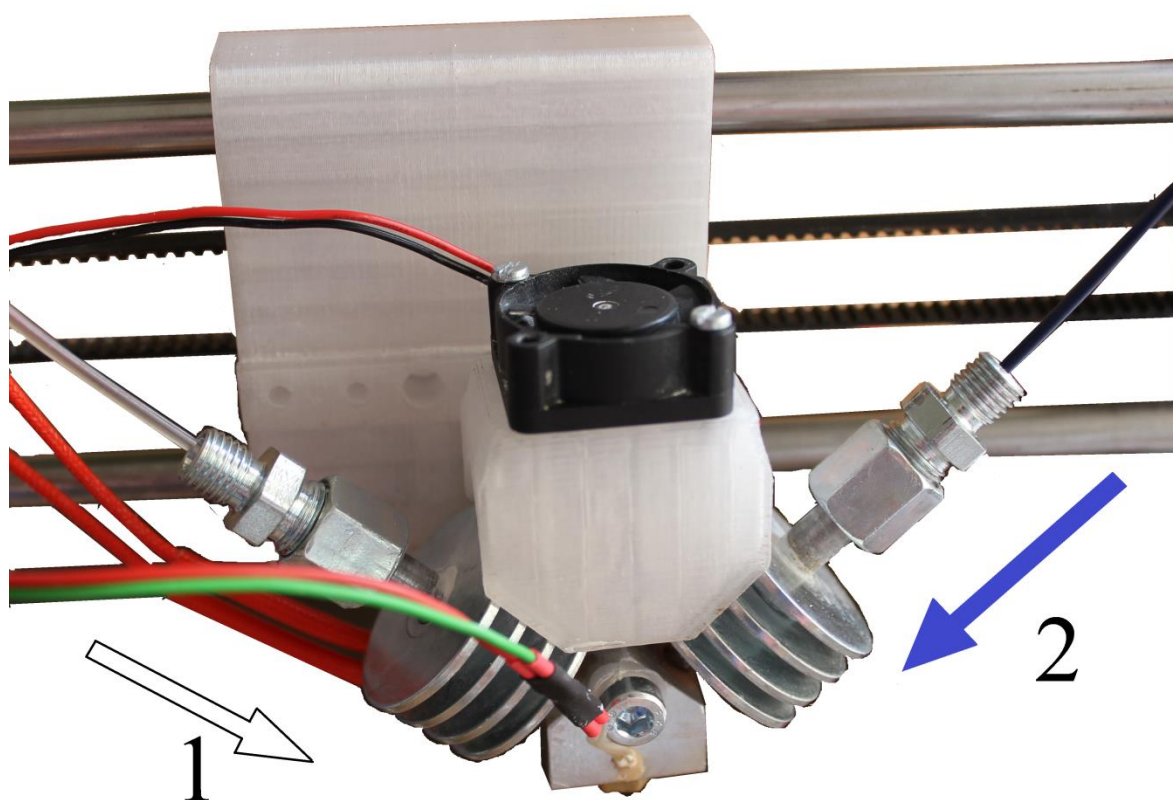
Materiál	ABS, Cobalt blue
Hmotnost struny	750 g
Průměr trysky	0,4 mm
Průměr struny	1,75±0,05 mm
Teplota tisku	220-240°C
Barva struny	kobaltová modrá

6.1.1 Průběh testování varianty „A“

Testování varianty „A“ (obr. 63) začíná ručním vsunutím obou strun do tiskové hlavy za pokojové teploty 20°C. Struny jsou vsunuty, až je patrné, že se dotýkají v tavné komoře. Následuje zahřátí tiskové hlavy na 215 °C. První je vtlačována struna č. 1, která se taví a prochází úspěšně skrz trysku. Po vsunutí 50 mm transparentní tiskové struny je tlačena struna č. 2, která úspěšně vytlačuje zbytky přechodného materiálu a taktéž je vsunuto 50 mm struny skrz tavnou komoru. Následuje opětovná výměna, kde je stále zachovávána teplota 210°C. Nyní je třeba k průchodu, vyvození již větší ruční síly, až dojde k úplnému zastavení. Následně je zkoušena tisková struna č. 2, která lze stále vtlačovat, ale za obtížných podmínek. Je zvednuta teplota na 215 °C. Toto nepřináší žádný výsledek. Teplota je postupně zvyšována po 5°, až na teplotu 240 °C, kde je stav vyhodnocen jako neschopné provozu.

Následuje demontáž trysky. Tryska je demontována ze zařízení a je čištěna. Čištění probíhá umístěním mosazné trysky do plamene sporákového hořáku. Zde je po dobu, než nedohoří zbytky plastu a poté je vyčištěna od zbytků sazí. Čistá tryska je opět upevněna k hotendu a pokus je opakován.

Za stejných podmínek nedochází ke zlepšení a při teplotě 235°C dochází pouze k 5 mm výtoku z trysky plastu s bublinami. Pokus je prohlášen jako neúspěšný.



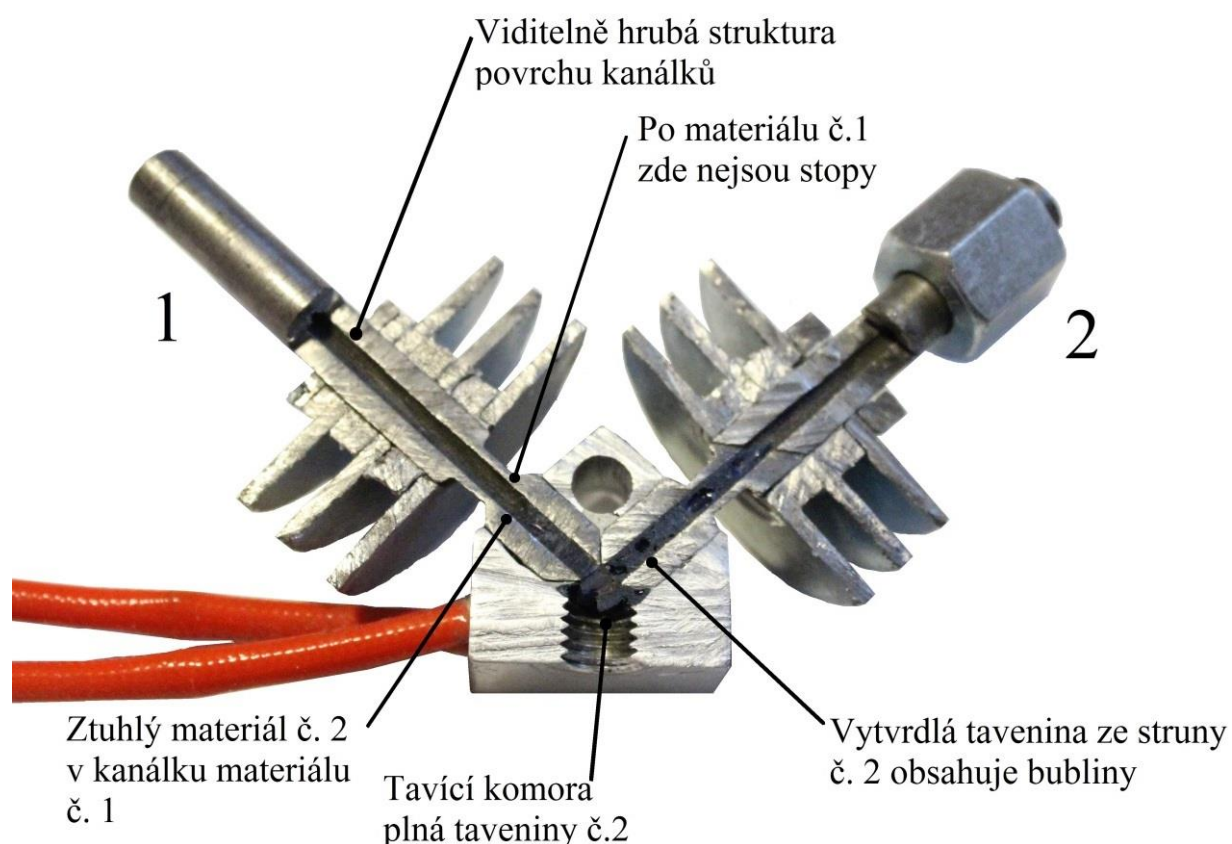
Obr. 63 Testování tiskové hlavy varianty „A“.

6.1.2 Vyhodnocení varianty „A“

Dle popsaného testování je dedukováno, že problém nastal v heatbrake. Zde se projevily vady v mírném odstupu a takřka identicky, je tedy pravděpodobné, že se jedná o konstrukční chybu a nikoli o náhodné příčině. Je možné, že toto bylo způsobeno několika příčinám nebo jejich kombinací. Některé z možných příčin:

- Velký vnitřní průměr heatbrake
 - materiál by měl šanci obtéci přiváděnou strunu a stuhnout ve vyšších místech, kde zabránil dalšímu posuvu
- Přílišná drsnost vnitřního průměru
 - při nadměrné drsnosti vnitřního povrchu může dojít k ulpívání materiálu na stěnách a ten může časem degradovat a znemožnit tak dalšímu posuvu
- Příliš malý průměr
 - materiál se vlivem teplotní roztažnosti může zapřít o stěny a způsobit tak znemožnění pohybu.
- Ucpání zbytky lepidla, nebo cizorodého vměstku
 - na tiskové struně se dostává prach a ulpěné částičky, které by mohly způsobit ucpání. Pravděpodobně by tak byla zacpána jedna tryska a toto je tedy spíše nepravděpodobné.

Pro zjištění závady je těleso rozříznuto s ohledem na zachování zbytků nataveného materiálu. Z tohoto řezu na (obr. 64) je patrné, že se modrá struna č. 2 dostává do prostoru struny č. 1. To je možná příčina, proč se struna č. 1 přestala pohybovat jako první. Tisková struna transparentní má nižší teplotu tání a mohla z tepelně ovlivněné oblasti vytéci do tavné komory, kde se smísila s modrou strunou a následně byla vytlačena skrz trysku ven. Zároveň její uvolněné místo bylo zaplňováno materiálem č. 2, což by mohlo vysvětlit, proč se materiál zastavil před krčkem. Z řezu nejsou patrné vměstky či jiné překážky. Není zde patrný ani spálený materiál. Bubliny zachycené v části č. 2 mohou značit vysokou teplotu a uvolňování plynů z taveniny. Tyto bubliny bývají zpravidla vytlačeny tryskou a doprovázejí tisk hlasitým praskáním. Bubliny nejsou brány jako pravděpodobná příčina. Odhalena je však velká drsnost povrchu kanálku, ve které pevně drží plast č. 2 i po rozříznutí. Špatný průměr trubky vyloučit tímto testem nemůžeme, ale pravděpodobně se jedná o vadu přílišné drsnosti povrchu s možnou doprovodnou příčinou velkého průměru. Při konstrukci následné tiskové hlavy je třeba tyto poznatky zohlednit a vyvodit opatření.



Obr. 64 Řez tiskovou hlavou varianty „A“.

6.2 Technologické testy varianty „B“

Pro testování varianty „B“ je zvolen materiál ABS - T z portálu www.plastymladec.cz. Tento portál inzeruje stejné parametry pro různé barvy. Tisk je doporučen pro teplotu hotendu mezi 200 – 230°C. Předehřátí tiskového stolu je doporučeno v rozmezí 90 a 100°C. Parametry jednotlivých testovaných materiálů jsou následující:

Struna č. 1

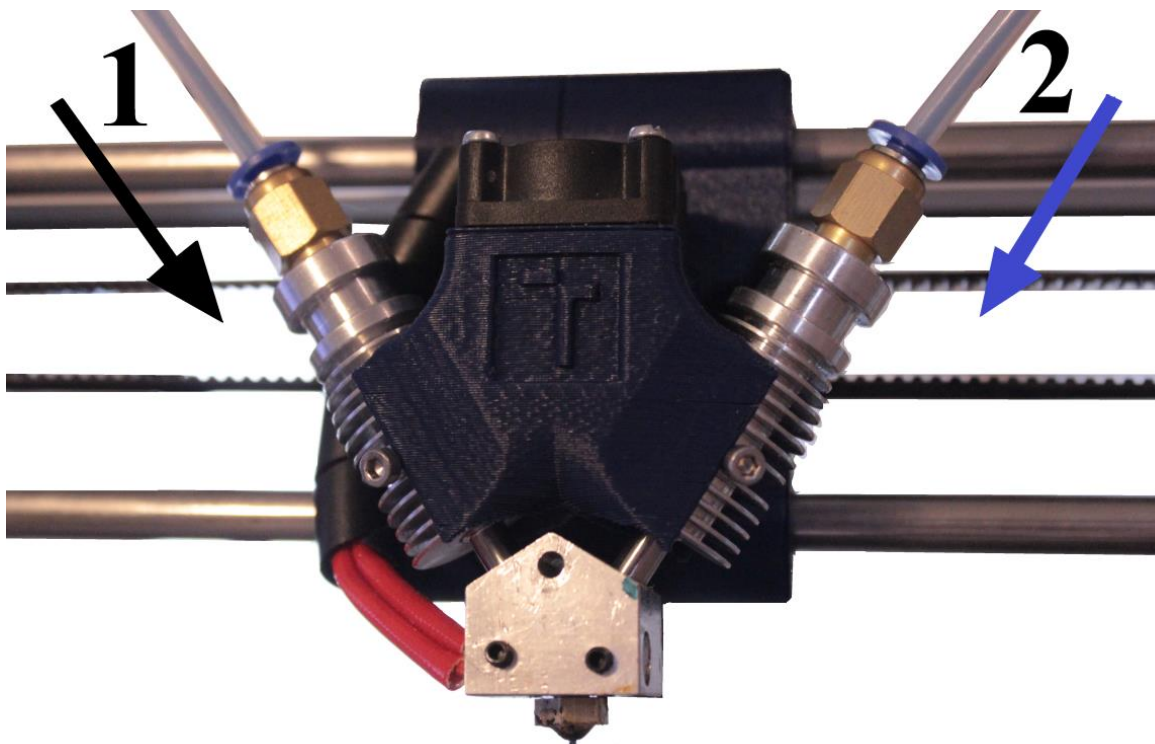
Materiál	ABS – T, transparentní modrá
Hmotnost struny	1 kg
Průměr trysky	0,8 mm
Průměr struny	1,75 ± 0,1 mm
Teplota tisku	200 - 230°C
Barva struny	průsvitná modrá

Struna č. 2

Materiál	ABS – T, černá
Hmotnost struny	750 g
Průměr trysky	0,8 mm
Průměr struny	1,75±0,1 mm
Teplota tisku	200-230 °C
Barva struny	černá

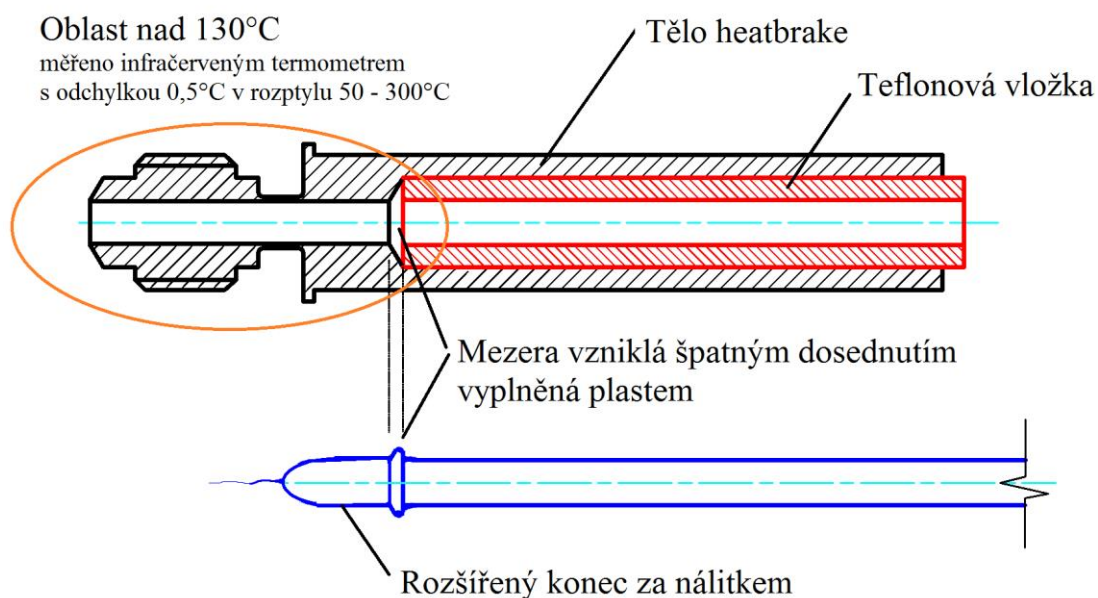
6.2.1 Průběh testování varianty „B“

Testování varianty „B“ začíná vsunutím struny č. 1 za pokojové teploty (obr. 65). Následuje vsunutí struny č. 2. Dle materiálového doporučení je nastavena počáteční teplota 200 °C. Struny č. 1 je zatlačována o 50 mm do tavné komory. Z trysky teče jednobarevné vlákno struny č. 1. Následně je opakováno vsunutí se strunou č. 2. Tato struna je také zatlačena 50 mm do tavné komory. Zpočátku je vytlačována barva struny č. 1. Jedna, ale postupným nahrazováním plastu v tavné komoře dojde během cca 35 mm vytlačeného vlákna ke kompletnímu barevnému přechodu. Tento pokus je testován opakovaně, následně nelze za 200 °C vytáhnout strunu č. 1 z hotendu a nelze s ním posunovat ani jedním směrem. Dojde k odzkoušení teplot až do výše 230 °C, kdy tavenina struny konečně povolí a struna je vytáhena.



Obr. 65 Testování tiskové hlavy varianty „B“.

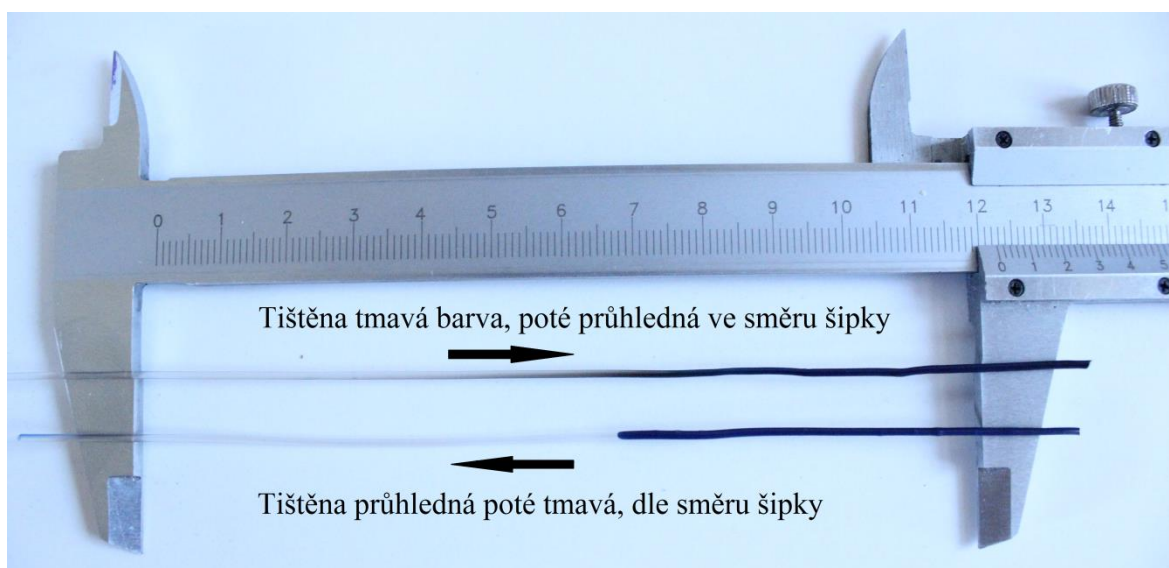
Po vytažení tiskové struny je zřejmé, že došlo k nedokonalému dosednutí a tisková struna se taví na rozhraní, kde je tento defekt viz (obr. 66). Toto je neopravitelná vada. Je třeba tento přechod posunout do míst, kde nedochází k tavení, nebo teflon vůbec nepoužít a provést heatbrake celokovový.



Obr. 66 Příčina zastavení tisku „B“.

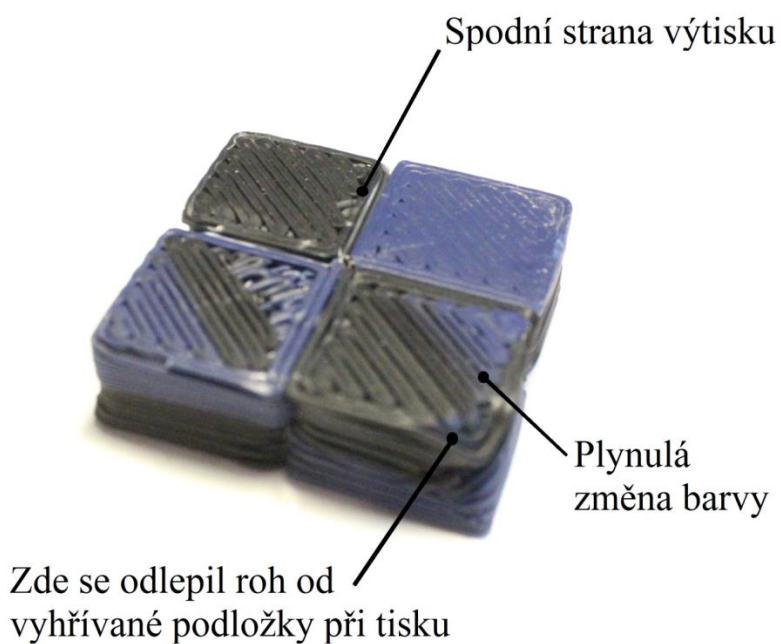
Tisková hlava je následně demontována, vyčištěna a do ohřívaného bloku je zašroubován heatbrake „B2“. Test je proveden identicky jako předchozí a nyní jde vše plynule. Po několikanásobném vystřídání tiskových strun a vystřídání cyklů ohřát zchladit, ponechání tiskové hlavy při teplotě 220°C 20 minut, lze konstatovat, že je tisková hlava použitelná. Nyní můžeme přistoupit k testování kvality tisku.

Na následujícím obrázku je vidět, jak vypadá barevný přechod mezi jednotlivými barvami. Při potřebě tisku s rychlým přechodem je třeba nastavit tisk první světlou barvou, která je rychle dobarvena tmavou, ideálně je třeba použít otírací věž, kde se přechodový materiál vytiskne mimo tisknutý dílec a ten je poté tištěn čistou barvou. Plocha otírací věže by měla mít minimální rozměr pro vytlačení celého přechodového materiálu. Náhled na barevné přestupy viz (obr 67).



Obr. 67 Barevné přechody při přepnutí zdroje materiálu „B“.

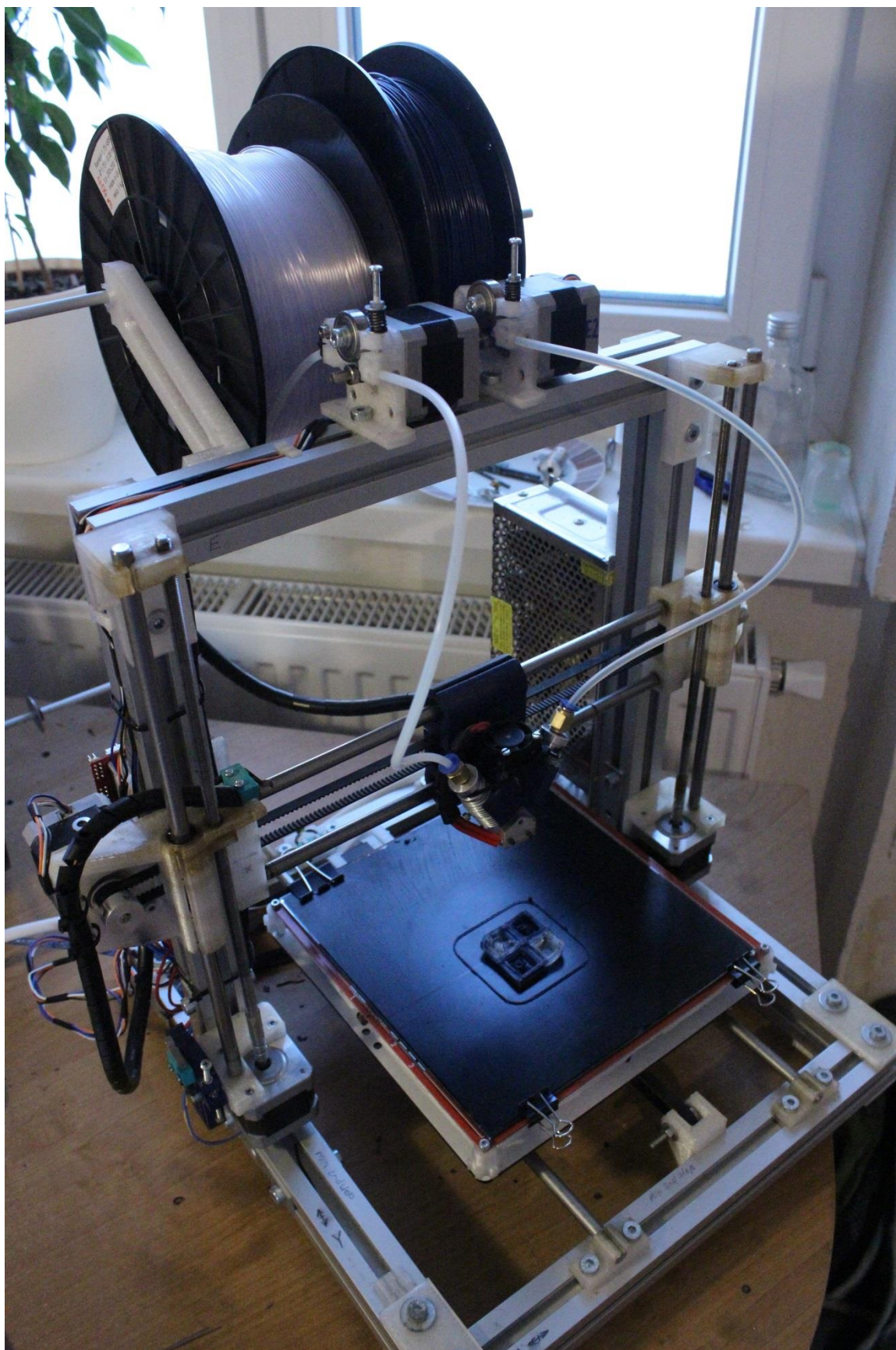
Tyto barevné přechody jsou třeba oddělit otíracím objektem, jinak dopadne výtisk jako na následujícím (obr 68). Jinak je zde patrné, že výměna strun při tisku funguje bezproblémově. Doladění tisku je již softwarovou záležitostí, která vyžaduje testování jedněch konkrétních podmínek. Je třeba nastavit správnou tloušťku první vrstvy, správnou teplotu podložky, vhodnou teplotu hotendu, sladit rychlost tisku v jednotlivých fázích tisku, vhodnou výplň objektu, optimální výšku tiskové vrstvy, sladit správně kroky motorku k posuvu tiskové struny, aktivní ofuk výtisku a mnoho dalších. Tato nastavení jsou dost často provázána s ostatními, kde jednou volbou je rušena či umocňován vliv volby předchozí.



Obr. 68 Dvoubarevný tisk tiskové hlavy varianty „B2“.

Bowdenové provedení má kromě výhod i špatnou vlastnost, která způsobuje prodlevy mezi vyvozením síly motorem a následného vyvození strunou do tavné komory. Při plynulém tisku tato vlastnost nemá vliv na kvalitu výtisku, při výměně strun však dojde k odlehčení zatížené – tisknoucí struny a k zatížení odlehčené – čekající struny. Tím vznikne prostor pro vychýlení struny v bowdenu a dojde ke zpoždění tisku. Dle vlastního pozorování se samotnou strunou a bowdenem dojde ke ztrátě posuvu vzniklé pružností systému. Tato ztráta je ovlivněna materiálem struny, světlostí bowdenu a šířkou tiskového vlákna av neposlední řadě délkou bowdenového vedení, kde platí, čím delší, tím je ztráta větší. Je proto třeba na 3D tiskárně bowdeny zkrátit na minimum. Fotografie optimalizovaných bowdenů na tiskárně Rebel II je na (obr. 68). Při testování není patrná změna ve ztrátách při změně přímosti bowdenu. Při zkoušce předpružení je zjištěn posuv cca o 4 mm za následujících parametrů:

- délka bowdenu, 400 mm
- materiál tiskové struny, ABS – T Cobalt blue
- průměr tiskové struny, $1,75 \pm 0,05$ mm
- vnitřní průměr teflonového bowdenu, 2 mm
- posuvová síla je vyvozená motorkem extruderu po délce 400 mm, kde je konec bowdenu spojen s tiskovou strunou.

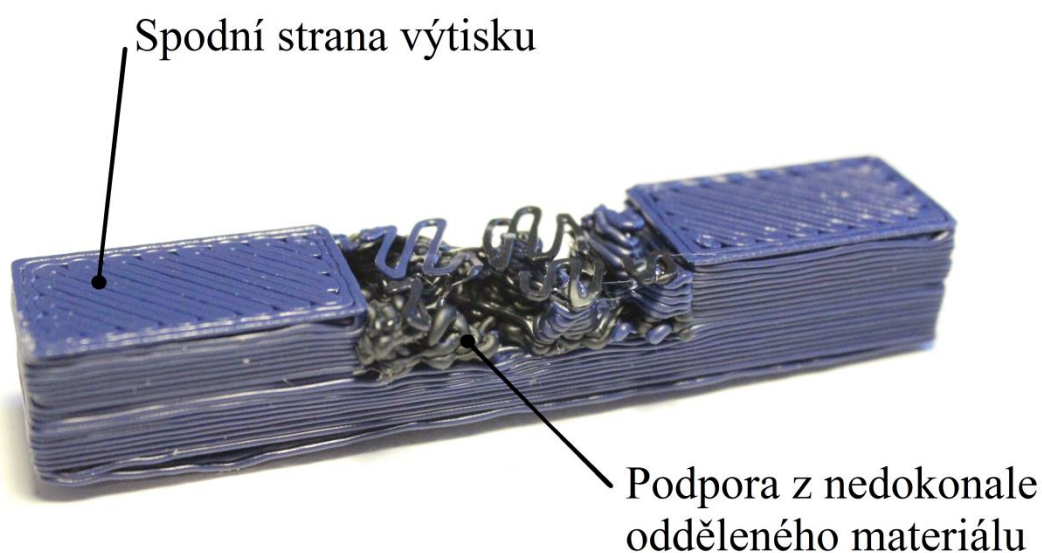


Obr. 68 Optimalizované délky bowdenů a pohled na funkční duální 3D tiskovou hlavu osazenou na tiskárně Rebel II.

6.2.2 Použitelnost tiskové hlavy varianty „B“

Duální tisková hlava má celou řadu uplatnění. Následující výčet vystihuje některé z nich:

- dvoubarevný tisk,
- tisk odbouratelných podpor viz (obr. 69),
- možnost tisknout odlišnou výplň výtisků,
- lze mít tiskárnu trvale osazenou 2 materiály, může se jednat o stejný typ, např. ABS, přičemž každý může být vhodný na tisk jiných rozměrů v závislosti na velikosti smrštění při chladnutí,
- plnohodnotný jednobarevný tisk (obr. 70),
- a další.



Obr. 69 Tisk podpory z odlišného materiálu.

Na následujícím obrázku je zachycena figurka „Marvin“, kterou používá server www.3dhubs.com jako srovnávací prvek. Tento výtisk doporučuje tisknout všem svým uživatelům. Tento server sdružuje uživatele, kteří inzerují výrobní kapacity své 3D tiskárny. Na základě vzorku „Marvina“ se zákazník rozhodne, u kterého dodavatele zakázku objedná. Tato figurka je vytištěna v měřítku původního Marvina 2,5:1, z důvodu větší trysky. Tento tisk dokazuje, že duální 3D tisková hlava je plně funkční.



Obr. 70 Srovnávací figurka „Marvin“.

7 ZHODNOCENÍ EKONOMICKÝCH PARAMETRŮ

Smyslem proč si stavět vlastní tiskárnu metody RepRap je především tlak na snížení pořizovací ceny a porozumění tématice. Pro výrobu duální tiskové hlavy metody FDM je třeba srovnání parametrů. Na trhu není mnoho podobných typů. Komerčně dostupný je nejbližší hotend Cyclop od společnosti E3D – Online. Ten je k dostání za 108 £ včetně poštovného. K datu 18.5.2016 činila neobchodní cena 1 libry dle ČNB 34,871 Kč. Při převodu činí výsledná cena 3766,068 Kč. Smyslem porovnání je pouze tisková hlava bez doplňujících komponentů, jakými je dodatečný motor, bowdeny, pojezd osy x a další.

7.1 Pořizovací cena duální tiskové hlavy varianty „B1“

Jedná se o výrobu specifického dílu, který je možné doplnit sériově vyráběnými částmi. Je zde tedy uvažováno o 2 pořizovacích nákladech. Náklady na nákup a náklady na výrobu. Nákup dílů je proveden v internetovém obchodě www.3draty.cz. Výroba je provedena v místní dílně.

Náklady na nákup dílů:

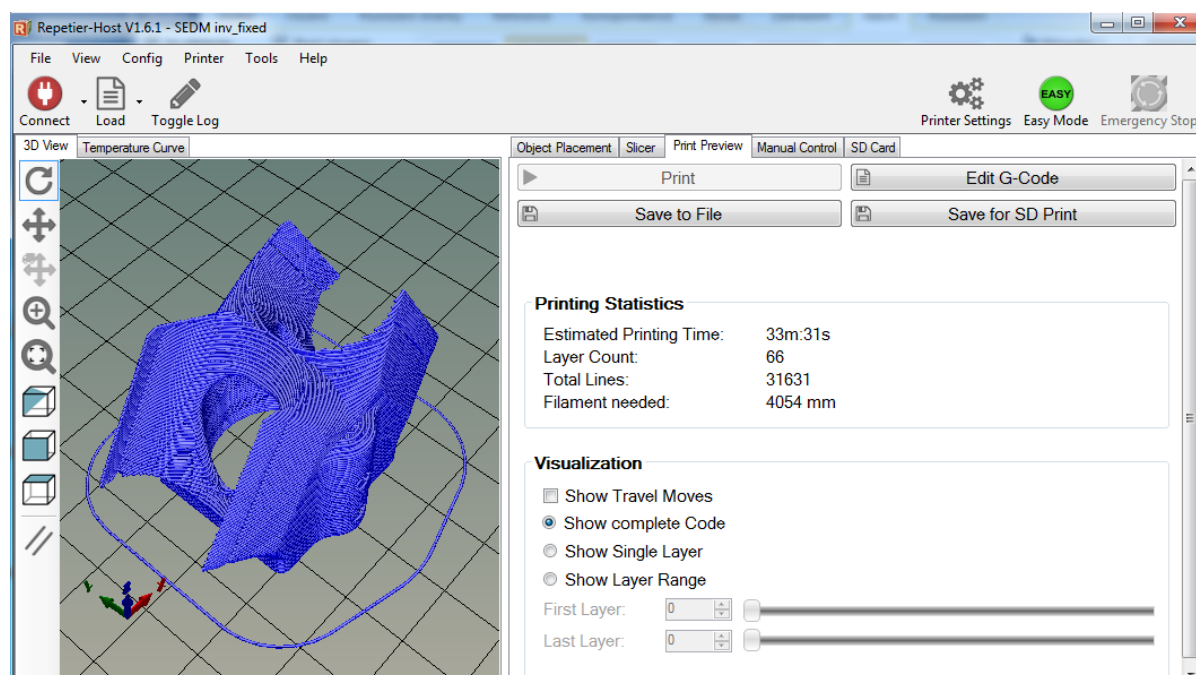
- 1x NTC 100k termistor skleněný,	69 Kč
- 2x hybridní heatbrake,	438 Kč
- 1x topný rezistor 12V/ 40W,	79 Kč
- 2x žebrovaný chladič,	398 Kč
- 1x ventilátor 25 x 25 mm, 12V,	69 Kč
- 1x mosazná tryska Ø 0,8 mm,	99 Kč
- doprava,	64,20 Kč
- daň z přidané hodnoty ve výši 21 %,	211,09 Kč
- celková cena nákupu.	1.216,20 Kč

Náklady na obrábění:

- frézování vyhřívaného bloku včetně materiálu,	350 Kč
- daň z přidané hodnoty ve výši 21 %,	73,5 Kč
- celková cena výroby,	423,5 Kč

Náklady na 3D tisk dílů se vypočítají ze spotřebované tiskové struny. Pro výpočet neuvažujeme spotřeby elektrické energie ani nevyužitý odpadní materiál. Tisková struna ABS - T je prodávána v internetovém obchodě www.plastymladec.cz. Je zde uvedena za cenu 605 Kč/Kg v celých jednokilogramových cívkách. Jeden kilogram tiskové struny zhruba odpovídá 404 metrům délky. Jeden metr odpovídá 1,5 Kč/m. pomocí programu Slicer vygenerujeme G – kód, který spočte délku trajektorie a propočítá spotřebovanou délku tiskové struny. Na následujícím

(obr. 71) je vidět propočtení tvarového držáku ventilátoru v náhledu programu Repetier – Host.



Obr. 71 Náhled na potřebnou délku tiskové struny v programu Repetier – Host.

Náklady na 3D tisk:

spotřeba tiskové struny pro tvarový držák ventilátoru 4.054 mm

cena 1 m tiskové struny 1,5 Kč/m

cena jednoho výtisku 6,1 Kč

Náklady na pořízení duální 3D tiskové hlavy jsou spočteny dle vzorce:

$$N_C = N_N + N_V + N_T = 1216,20 + 423,5 + 6,1 = 1645,8 \text{ Kč} \quad (6)$$

Kde:

N_C	[Kč]	- pořizovací náklady jedné duální tiskové hlavy varianty „B2“,
N_N	[Kč]	- náklady na nákup dílů,
N_V	[Kč]	- náklady výrobu ohřívacího bloku
N_T	[Kč]	- náklady tisk tvarového držáku ventilátoru.

Tab. 6.1 Srovnání nákladů na pořízení duální 3D tiskové hlavy

Popis	Pořizovací náklady
Duální tisková hlava Cyclop	3.766,1 Kč
Duální 3D tisková hlava variant "B2"	1.645,8 Kč

Při porovnání cen vyjde jednoznačně výhodnější varianta Duální 3D tiskové hlavy. Vyjde zhruba na 44 % pořizovacích nákladů Tiskové hlavy Cyclop. Je třeba také počítat s tím, že kurz mezi měnami je v neustálém pohybu.

ZÁVĚR

Tato diplomová práce, vycházející ze studia dostupné literatury, komunitních fór a vlastních zkušeností s tiskem a jeho testováním na tiskárně Rebel II.

V teoretické části jsou okrajově popsána témata, jakými jsou RepRap, rapid prototyping, metody 3D tisku se zaměřením na metodu FDM. Také jsou zde popsány jednotlivé části tiskárny, se zaměřením na tiskovou hlavu, vybrané materiály, technologické parametry tisku a další doprovodné znalosti nutné pro započítání stavby duální 3D tiskové hlavy.

V další části je realizován výběr testovací 3D tiskárny a její popis s konkrétními díly, kterých je využito při přestavbě tiskárny na stroj umožňující tisk dvěma materiály. Vše je navrženo tak, aby bylo možno využít většinu původních dílů s ohledem na minimální výslednou cenu výrobku.

Před samotným návrhem duální 3D tiskové hlavy je třeba vytyčit požadavky a vlastnosti navrhované hlavy. Je také třeba definovat parametry, které musí splňovat, aby byla způsobilá provozu na pořízené tiskárně Rebel II.

Po předchozích shrnutích je započato s návrhem a konstrukcí duální 3D tiskové hlavy. Tato hlava má víc úskalí, než je na první pohled patrné a je proto vypracována ve dvojím provedení. Tato provedení se liší svým zaměřením. První tisková hlava nazvaná varianta „A“ je zaměřena na minimální tavnou zónu pro maximální kvalitu tisku, zejména však rychlé střídání barev. Její konstrukce však neumožňuje rozebíratelnost, vyměnitelnost všech dílů a také neumožňuje snadné čištění. Druhá tisková hlava nazvaná popořadě variantou „B“, má v návrhu zahrnut opačné požadavky, a to snadnou rozebíratelnost, vyměnitelnost a dobrý přístup pro čištění všech částí. Těmito opatřeními je však tisková hlava předurčena k větší tavné komoře a tím pomalejší výměně materiálu.

Na základě předchozích návrhů je provedena výroba 2 tiskových hlav. Obě varianty jsou popsány a testovány. Zde se ukáže jako fatální nevýhoda varianty „A“, a to špatná dostupnost pročištění a nerozebíratelnost. Tisk se totiž po prvních pár minutách zasekne a je zvolena varianta zjištění závady s následkem zničení tiskové hlavy varianty „A“. Z poznatků plynoucích z neúspěchů tisku první varianty je bráno ponaučení a tisková hlava varianty „B“ je patřičně upravena. Při testování varianty „B“ je pozorován podstatně lepší výsledek, ale i tak se tisk ucpe. Díky své rozebíratelnosti je tisková hlava rozdělena a zjištěna závada. Tato závada je odstraněna výměnou za nový heatbrake. Od této výměny je varianta „B“ vedena jako varianta „B2“. Ta se ukáže jako bezproblémová, na níž je možno tisknout plnohodnotné díly. Následně jsou provedeny demonstrační tisky s uvedením využitelnosti této hlavy v praxi. Otázka vzhledného tisku je tedy již otázkou správné volby materiálů a parametrů tisku.

Na závěr je vypočtena pořizovací cena duální 3D tiskové hlavy varianty „B2“, která činí 1645,8 Kč. Ta je srovnána s konkurenční tiskovou hlavou Cyclop dostupnou za 3766,1 Kč. Varianta „B2“ vychází zhruba na 44 % nákladů tiskové hlavy Cyclop.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. PLCHOVÁ, Anna a Michal KOLESÁR. *Moderní metody v konstrukční praxi*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita, 2004, 66 s. ISBN 80-248-0538-3.
2. SLOTA, Ján, Martin MANTIČ a Ivan GAJDOŠ. *Rapid Prototyping a Reverse Engineering v strojárstve*. Vyd. 1. Košice: Strojnícka fakulta, Technická univerzita v Košiciach, 2010, 207 s. ISBN 978-80-553-0548-6.
3. FOŘT, Petr a Jaroslav KLETEČKA. *Autodesk Inventor: funkční navrhování v průmyslové praxi*. 2. aktualiz. vyd. Brno: Computer Press, 2007, 296 s. ISBN 978-80-251-1773-6.
4. WANG, Wego. *Reverse Engineering: Technology of Reinvention*. 1. vyd. Boca Raton, Florida: Taylor & Francis Group, 2011, 322 s. ISBN 978-1-4398-0630-2.
5. Reverzní inženýrství v důlní praxi. In 3D SCAN [online]. © 2013 [cit. 25-04-2015]. Dostupné z <http://www.3d-skenovani.cz/clanky-a-novinky/15-reverzni-inzenyrstvi-v-dulni-praxi>
6. CHUA, Chee Kai, Kah Fai LEONG a Chu Sing LIM. *Rapid prototyping: Principles and Applications*. 3. vyd. Singapore: World Scientific Publishing Co., 2010, 512 s. ISBN 978-981-277-897-0.
7. JAMES O. HAMBLEEN, James O. Tyson S. *Rapid prototyping of digital systems*. 2nd ed. New York: Springer, 2007. ISBN 03-877-2670-5.
8. *About Stratasys*. In Stratasys [online]. © 2015 [cit. 25-04-2015]. Dostupné z <http://www.stratasys.com/corporate/about-us>
9. Stereolithography. In C ustompartnet [online]. © 2009 [cit. 23-04-2015]. Dostupné z <http://www.custompartnet.com/wu/stereolithography>
10. ŘASA, J., P. POKORNÝ a V. GABRIEL. *Strojírenská technologie 3 - 2. díl - Obráběcí stroje pro automatizovanou výrobu, fyzikální technologie obrábění*. 1. vyd. Praha, Scientia, spol. s r.o., 2001. 222 s. ISBN 80-7183-227-8.
11. Brno. Department of Reverse Engineering and Additive Technologies. Rapid prototyping. 3D tisk SLM. In Univerzity of Technology. [online]. 2014 [cit. 25-04-2015]. Dostupné z <http://3dlaboratory.cz/rapid-prototyping/>
12. Chladicí kanálky. In 14220 [online]. 2013 [cit. 25-04-2015]. Dostupné z <http://www.14220.cz/wp-content/uploads/2013/05/3D-tisk-3-3.jpg>
13. Introduction. Efundu [online]. © 2015 [cit. 27-04-2015]. Dostupné z http://www.efunda.com/processes/rapid_prototyping/intro.cfm
14. JACOBS, Paul F. *Rapid Prototyping & Manufacturing: Fundamentals of Stereolithography*. Dearborn (Mich.): Society of Manufacturing Engineers, 1992. 434 s. ISBN: 0872634256.
15. BELL, Charles. *Maintaining and Troubleshooting Your 3D Printer*. Apress, 2014. 528 s. ISBN 978-1-4302-6809-3.
16. Rapid Prototyping. In Fielding Manufacturing [online]. © 2004 - 2010 [cit. 27-04-2015]. Dostupné z <http://www.fieldingmfg.com/rapid-prototyping.asp>

- 17.About. In Reprap [online]. 2014 [cit. 29-04-2015]. Dostupné z <http://reprap.org/wiki/About>.
- 18.GNU Operating System. *Často kladené otázky o GNU GPL* [online]. 1996, 1997, 1998, 1999, 2000 Free Software Foundation. [cit. 30-04-2015]. Dostupné z <http://www.gnu.org/licenses/gpl-faq.cs.html>
- 19.RepRap OneDarwin. In Reprap. [online]. 2015 [cit. 30-04-2015]. Dostupné z <http://reprap.org/wiki/RepRapOneDarwin>
- 20.Jak vybrat 3D tiskárnu. In Josef Prusa [online]. 2015 [cit. 27-05-2015]. Dostupné z <http://josefprusa.cz/vyber-3d-tiskarny/>
- 21.PRŮŠA, Josef a Michal PRŮŠA. Základy 3D tisku [online]. © 2014 Prusa Research s.r.o. [cit. 30-04-2015]. Dostupné z <http://docplayer.cz/1760094-Zaklady-3-d-tisku-prusa3d-cz.html>
22. FDM Technology. Stratasys [online]. 2015 [cit. 2-05-2015]. Dostupné z <http://www.stratasys.com/3d-printers/technologies/fdm-technology>
23. PÍŠKA, Miroslav et al. Speciální technologie obrábění. 1. vyd. Brno: CERM, 2009, 246 s. ISBN 978-80-214-4025-8.
- 24.Fused deposition modelling. In Wikipedia [online]. 2015 [cit. 2-05-2015]. Dostupné z https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/42/FDM_by_Zureks.png
- 25.Category:Extruders. In Reprap [online]. 2015 [cit. 2-05-2015]. Dostupné z <http://reprap.org/wiki/Category:Extruders>
26. Thermal Conductivity. In Reprap [online]. 2015 [cit. 2-05-2015]. Dostupné z http://reprap.org/wiki/Thermal_Conductivity
- 27.File:Lama3D mes.jpg. In Reprap [online]. 2015 [cit. 2-05-2015]. Dostupné z http://reprap.org/wiki/File:Lama3D_mes.jpg
- 28.Polytetrafluorethylen. In Wikipedia [online]. 2015 [cit. 5-05-2015]. Dostupné z <https://cs.wikipedia.org/wiki/Polytetrafluorethylen>
- 29.Hot End Design Theory. In Reprap [online]. 2015 [cit. 2-05-2015]. Dostupné z http://reprap.org/wiki/Hot_End_Design_Theory
- 30.HEYWOOD, Mark. J-Head MK-IV Hot End Clone Design Quick Review. In airtripper.com [online]. 2013 [cit. 5-05-2015]. Dostupné z <http://airtripper.com/1236/j-head-mk-iv-hot-end-clone-design-quick-review/>
- 31.Hot End. In Reprap [online]. 2015 [cit. 2-05-2015]. Dostupné z http://reprap.org/wiki/Category:Hot_End
- 32.PTFE vs PEEK – A Comparison of Properties. In polyfluorold.blogspot [online]. 2013 [cit. 2-05-2015]. Dostupné z <http://polyfluorold.blogspot.cz/2013/11/ptfe-vs-peek-comparison-of-properties.html>
- 33.H.BROOKS,A. E. W. RENNIE, T. N. ABRAM,J. McGOVERN &F. CARON. Variable Fused Deposition Modelling – Concept Design and Tool Path Generation In researchgate.net [online]. 2016 [cit. 22-05-2016]. Dostupné z

http://www.researchgate.net/profile/Hadley_Brooks/publication/256504043_Variable_fused_deposition_modelling_-_concept_design_and_tool_path_generation/links/02e7e5375c1c9dc7c3000000.pdf

34. Technology. In Mosaic Manufacturing [online]. 2015 [cit. 2-05-2015]. Dostupné z <http://www.mosaicmanufacturing.com/pages/technology>
35. Holandsko. The Kraken. In Juliusdeboer [online]. 2015 [cit. 2-05-2015]. Dostupné z <http://www.juliusdeboer.nl/the-kraken/>
36. England. E3D-v6. In E3D-ONLINE [online]. © 2014 [cit. 2-05-2015]. Dostupné z <http://e3d-online.com/E3D-v6>
37. Diamond Hotend makes multi-color 3D printing possible from a single nozzle. In Gizmag [online]. 2015 [cit. 2-05-2015]. Dostupné z <http://www.gizmag.com/diamondhotend-color-3d-printer-extruder/36950/>
38. Diamond Hotend. In Reprap [online]. 2015 [cit. 10-05-2015]. Dostupné z http://reprap.org/wiki/Diamond_Hotend
39. England. Cyclops. In E3D-ONLINE [online]. © 2014 [cit. 11-05-2015]. Dostupné z <http://e3d-online.com/Cyclops>
40. England. Cyclops & Chimera Documentation. In E3D-ONLINE [online]. 2015 [cit. 11-05-2015]. Dostupné z <http://e3d-online.com/E3D-v6>
41. England. Multi-Extrusion. In E3D-ONLINE [online]. © 2014 [cit. 12-05-2015]. Dostupné z <http://e3d-online.com/Multi-Extrusion>
42. Filament. In Reprap [online]. 2015 [cit. 12-05-2015]. Dostupné z http://reprap.org/wiki/Feeding_filament
43. What is a bowden extruder. In 3d printing for beginners [online]. © 2015 3D Printing for Beginners [cit. 12-05-2015]. Dostupné z <http://3dprintingforbeginners.com/2013/07/what-is-a-bowden-extruder/>
44. Erik's Bowden Extruder. In Reprap [online]. 2015 [cit. 10-05-2015]. Dostupné z http://reprap.org/wiki/Erik's_Bowden_Extruder
45. CHILSON, Luke. Filament Tolerances and Print Quality. In protoparadigm [online]. 2011 [cit. 10-05-2015]. Dostupné z <http://www.protoparadigm.com/news-updates/filament-tolerances-and-print-quality/>
46. ABS. In GEORG FISCHER [online]. Copyright © 2012 Tribon [cit. 15-05-2015]. Dostupné z http://www.georgefischer.cz/produkty/materialy/abs-akrylonitril_butadien_styren
47. Česko. PC-ABS for Fortus 3D Production. In Evektor [online]. ©2015 [cit. 15-05-2015]. Dostupné z <http://www.evektor.cz/sites/default/files/pdf/ms-pc-abs-fortus.pdf>
48. In Cheap 3d filaments [online]. [cit. 15-05-2015]. Dostupné z <https://cheap3dfilaments.com/img/cms/3d-filament.jpg>
49. Amsterdam. 3D Printing Trends May 2016. In 3D Hubs [online]. 2016 [cit. 22-05-2016]. Dostupné z <https://www.3dhubs.com/trends>

50. Parametry pro tisk ABS. In Easycnc [online]. Copyright © 2015 [cit. 17-05-2015]. Dostupné z <http://www.easycnc.cz/inpage/abs/>
51. Parametry pro tisk PLA. In Easycnc [online]. Copyright © 2015 [cit. 17-05-2015]. Dostupné z <http://www.easycnc.cz/inpage/pla/>
52. Praha Czech Republic. 3D Tiskárna Prusa I3 plus. In Prusa Research [online]. 2015 [cit. 22-05-2015]. Dostupné z <http://shop.prusa3d.com/cs/3d-tiskarny/59-stavebnice-3d-tiskarny-prusa-i3-plus-s-lcd.html>
53. Česko. Stavebnice 3D tiskárny REBEL II. In JRC centrum [online]. 2015 [cit. 21-05-2015]. Dostupné z http://www.jrc.cz/3d_tisk_stavebnice_3d_tiskarny_rebel_ii
54. Soubory ke stažení. In JRC centrum [online]. 2015 [cit. 22-05-2015]. Dostupné z http://www.jrc.cz/3dsoubory/navod_rebel_ii_051.pdf
55. Česko. Stavebnicový systém Kombi. In Ehlinik [online]. © 2015 [cit. 22-04-2015]. Dostupné z <http://www.ehlinik.cz/stavebnicovy-system-kombi/kat-1200000101.html>
56. Heated Bed. In Reprap [online]. 2015 [cit. 25-05-2015]. Dostupné z http://reprap.org/wiki/Heated_Bed
57. Zdroj pro 3D tiskárnu REBEL II, kompletní. In JRC centrum [online]. 2015 [cit. 24-05-2015]. Dostupné z http://www.jrc.cz/3d_tisk_zdroj_pro_3d_tiskarnu_rebel_ii_kompletni
58. Arduino Mega. In Arduino [online]. ©2016 Arduino [cit. 23-05-2015]. Dostupné z <https://www.arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega>
59. RAMPS 1.4 (s IRF1404). In JRC centrum [online]. 2015 [cit. 22-05-2015]. Dostupné z http://www.jrc.cz/3d_tisk_ramps_1_4_s_irf1404?utm_source=0&utm_medium=0&utm_campaign=Doporucujeme
60. RAMPS 1.4. In Reprap [online]. 2015 [cit. 22-05-2015]. Dostupné z http://www.reprap.org/wiki/RAMPS_1.4
61. Driver krokového motoru DRV 8825. In JRC centrum [online]. 2015 [cit. 26-05-2015]. Dostupné z http://www.jrc.cz/3d_tisk_driver_krokového_motoru_drv_8825?utm_source=0&utm_medium=0&utm_campaign=Doporucujeme
62. Arctic Silver™ Thermal Adhesive. In Arctic Silver [online]. © 2015 [cit. 27-05-2015]. Dostupné z http://arcticsilver.com/arctic_silver_thermal_adhesive.htm
63. Stepper motor. In Reprap [online]. 2015 [cit. 27-05-2015]. Dostupné z http://reprap.org/wiki/Stepper_motors

64. Krokový motor pro 3D tiskárnu. In JRC centrum [online]. 2015 [cit. 26-05-2015]. Dostupné z http://www.jrc.cz/3d_tisk_krokovy_motor_pro_3d_tiskarnu_nema_17_0_5n_m_microcon_sx17_1005lgef
65. NTC 100k termistor skleněný. In Rebelove [online]. 2015 [cit. 27-05-2015]. Dostupné z http://obchod.rebelove.org/elektronika/25-ntc-100k-termistor-skleneny.html?search_query=Termistor&results=8
66. Thermistor. In Reprap [online]. 2015 [cit. 26-05-2015]. Dostupné z <http://reprap.org/wiki/Thermistor>
67. Sada koncových spínačů pro REBEL II. In JRC centrum [online]. 2015 [cit. 27-05-2015]. Dostupné z http://www.jrc.cz/3d_tisk_sada_koncovych_spinacu_pro_rebel_ii
68. Endstop. In Reprap [online]. 2015 [cit. 27-05-2015]. Dostupné z <http://reprap.org/wiki/Endstop>
69. Managing your filament. In Reprap [online]. 2015 [cit. 27-05-2015]. Dostupné z http://reprap.org/wiki/Managing_your_filament
70. Ramps1.4. In GeeTech Wiki. [online]. 2015 [cit. 27-05-2015] <http://www.geeetech.com/wiki/index.php/Ramps1.4>
71. Repetier-Firmware. In Reprap [online]. 2015 [cit. 27-05-2015]. Dostupné z <http://reprap.org/wiki/Repetier-Firmware>
72. Repetier-Firmware configuration tool for version 0.92.9 version. In Reprap [online]. 2015 [cit. 27-05-2015]. Dostupné z <https://www.repetier.com/firmware/v092/index.php>
73. GÜDE MBS 125 V pásová pila na kov. In Kamody [online]. © 2004 - 2015 [cit. 28-05-2015]. Dostupné z http://www.kamody.cz/gude-mbs-125-v-pasova-pila-na-kov-40543-116885?gclid=Cj0KEQjw4fCqBRDM1ZKhk5jfo6IBeiQAZQ97OCvsbC5SNLOZff4Y4gyq_Z6Y8sNqU9D2CVOkiPmghZkaAgUG8P8HAQ
74. Česko. Dvoukotoučová bruska OPTIgrind SM 200 (230 V). In BOUKAL Stroje-nářadí [online]. © 2004 - 2015 [cit. 28-05-2015]. Dostupné z <http://shop.boukal.cz/kovoobrabeci-stroje/dvoukotoucova-bruska-optigrind-sm-200-230-v/>

75. Česko. Stolní soustruh. In První Hanácká BOW [online]. 2015 [cit. 28-05-2015]. Dostupné z <http://www.bow.cz/produkt/3420301-stolni-soustruh-opti-d-180-x-300-vario/>
76. Stolní frézka. In BOUKAL Stroje-nářadí [online]. © 2004 - 2015 [cit. 28-05-2015]. Dostupné z <http://shop.boukal.cz/kovoobrabeci-stroje/stolni-frezka-optimill-bf-16-vario/>
77. LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření. 1. vyd. Úvaly: Albra, 2003, xv, 865 s. ISBN 80-86490-74-2
78. Tyče 4 hranné ze slitin hliníku. In ALMS [online]. © 2012 [cit. 29-05-2015]. Dostupné z <http://www.alms-brno.cz/kategorie/3-tyce-4-hranne-ze-slitin-hliniku/>
79. AlCuMgPb. In aluminiumcentrum [online]. [cit. 29-05-2015]. Dostupné z <http://www.aluminiumcentrum.com/vlastnosti8.html>
80. Hybridní heatbrake. In 3draty [online]. © 2014 [cit. 29-05-2015]. Dostupné z <https://3draty.cz/cs/hotend/53-hybridni-heatbrake.html>
81. Moje úpravy Rebelo. In Rebelove [online]. 2015 [cit. 27-05-2015]. Dostupné z <http://www.rebelove.org/viewtopic.php?f=24&t=46>
82. Teflonová páska - Val Flon. In Temax Tech [online]. © 2010 [cit. 29-05-2015]. Dostupné z <http://www.temax.cz/produkty-teflonova-paska-val-flon.html>
83. Česko. Hydraulické šroubení. In J.S.C. Brno [online]. © 2015 [cit. 29-05-2015]. Dostupné z <http://www.jsc-brno.cz/katalog/zbozi/katalog.asp?skup=16>
84. KOCMAN, Karel. Technologie obrábění. 2. vyd. Brno: CERM, 2005, 270 s. ISBN 80-214-3068-0
85. Stanovení otáček nástroje dle jeho průměru a řezné rychlosti. In STIMZET, [online]. 2015 [cit. 29-05-2015]. Dostupné z http://www.stimzet.cz/data/rezne_rychlosti_cz.html
86. Česko. OXyShop. Fréza válcová čelní. In Kovonastroje [online]. © 2015 [cit. 29-05-2015]. Dostupné z <http://www.kovonastroje.cz/Nastroje-pro-kovoobrabeni/Frezovani/Frezy/Frezy-na-kuzelu-MK/Freza-valcova-celni-16mm-3br-HSSCo5-kratka-hrubozuba-MK2-typ-W.html?redirected=1>

87. Česko. Stopkové frézy. In abefekt [online]. © 2007 [cit. 29-05-2015].

Dostupné z

http://www.abefekt.cz/editor/image/stranky3_soubory/kat_202_cz.pdf

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
ABS	[-]	acilonitrile butadiene styrene
FDM	[-]	fused deposition modeling
HIIPS	[-]	houževnatý polystiren
PEEK	[-]	polyaryletherketone
PLA	[-]	polyactid acid
PTFE	[-]	polytetrafluoretylen
RepRap	[-]	replicating rapid
3D	[-]	Three dimension

Symbol	Jednotka	Popis
D	[mm]	průměr nástroje
I	[A]	proud
I	[A]	proud
N_C	[Kč]	pořizovací náklady jedné duální tiskové hlavy varianty „B2“
N_C	[Kč]	pořizovací náklady jedné duální tiskové hlavy varianty „B2“
N_N	[Kč]	náklady na nákup dílů
N_T	[Kč]	náklady tisk tvarového držáku ventilátoru
N_V	[Kč]	náklady výrobu ohřívacího bloku
P	[W]	výkon
U	[V]	napětí
f_n	[mm]	posuv na otáčku
f_z	[mm]	posuv na zub
h_m	[mm]	Naměřená vzdálenost
h_p	[mm]	Kalibrační dráha přejezdu trysky
h_s	[mm]	tloušťka zrcadlové podložky na stůl
h_t	[mm]	výška stolu od trysky
n	[min ⁻¹]	otáčky vřetene
v_c	[m.min ⁻¹]	řezná rychlost
z	[-]	počet zubů frézy

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Výrobní výkres ohřívacího bloku varianta „B“ (format A2)

Příloha 2 Výrobní výkres heatbrake varianta „B1“ (format A3)

